

**MÉTODOS CLASICOS DE CONTROL DE TENSIÓN PARA LOS REGULADORES
AUTOMÁTICOS DE TENSIÓN EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS**

**FRAND EDUAR ESCOBAR ROMERO
BRYAN DAVID BETANCOURT OROZCO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2019**

**MÉTODOS CLASICOS DE CONTROL DE TENSIÓN PARA LOS REGULADORES
AUTOMÁTICOS DE TENSIÓN EN LOS GENERADORES SÍNCRONOS**

**FRAND EDUAR ESCOBAR ROMERO
BRYAN DAVID BETANCOURT OROZCO**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR EL TÍTULO
DE INGENIERO ELECTRICISTA**

**DIRECTOR
ING. ALFONSO ALZATE GÓMEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA**

2019

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a mi madre, padre y hermano que con su incondicional apoyo y sabias palabras me guiaron a crecer y ser la persona que hoy soy. A mi director de tesis, por sus sabios concejos y todo el aliento brindado para culminar este proyecto. A mi compañero de tesis por la paciencia y apoyo brindada durante el proceso y a la Universidad Tecnológica de Pereira por inculcar en mí estos valiosos conocimientos.

Bryan David Betancourt Orozco

A mi padre Guillermo y a mi madre Liliana por ser el principal pilar de mi vida. Por su sacrificio y esfuerzo, brindándome todo lo necesario para culminar mis estudios. Por su gran apoyo durante todos estos años de formación, sus consejos, su comprensión, por escucharme y creer en mí, por su amor incondicional y por brindarme todo lo que soy como persona. ¡Los Amo!

Frans Eduar Escobar Romero

ÍNDICE

RESUMEN.....	6
1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
2. CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 DEFINICIÓN.....	10
2.2 PROBLEMA DE ESTABILIDAD EN LOS GENERADORES.....	10
2.3 MÁQUINA SÍNCRONA.....	10
2.4 SISTEMAS DE EXCITACIÓN.....	11
2.5 REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSIÓN (AVR).....	12
3. CAPITULO 3. TÉCNICAS Y METODOLOGIAS CLASICAS DE CONTROL.....	12
3.1 TÉCNICAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA – DIAGRAMAS DE BODE.....	13
3.2 TÉCNICA DEL LUGAR DE LA RAÍCES - ROOT LOCUS	14
3.3 FILTRO LEAD.....	14
3.4 FILTRO LAG.....	15
3.5 FILTRO LEAD-LAG	16
4. CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL Y SINTONIZACIÓN DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN.....	17
4.1 DISEÑO DE COMPENSADORES MEDIANTE TÉCNICAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	17
4.1.1 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO POR RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	19
4.1.2 DISEÑO COMPENSADOR DE ATRASO POR RESPUESTA EN FRECUENCIA	23
4.1.3 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO-ATRASO POR RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	28
4.2 DISEÑO DE COMPENSADORES MEDIANTE TÉCNICA DEL LUGAR DE LAS RAÍCES (LGR).....	28
4.2.1 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO POR LUGAR DE LAS RAÍCES	29
4.2.2 DISEÑO COMPENSADOR DE ATRASO POR LUGAR DE LAS RAÍCES.	39
4.2.3 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO-ATRASO POR LUGAR DE LAS RAÍCES.	42
5. CAPITULO 5. REDES DE COMPENSACIÓN EN MODELO DE TERCER ORDEN.	46
5.1 DISEÑO DEL COMPENSADOR DE ADELANTO MEDIANTE LA TRAZAS DE BODE PARA EL MODELO 2. 48	
5.2 DISEÑO DEL COMPENSADOR DE ADELANTO MEDIANTE LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES PARA EL MODELO 2.	52
6. CAPITULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS	56
6.1 ANÁLISIS PARA EL MODELO 1.....	56
6.2 ANÁLISIS PARA EL MODELO 2.....	58
7. CAPITULO 7. CONCLUSIONES	59
8. CAPITULO 8. REFERENCIAS.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema de excitación de un generador síncrono. [8]	11
Figura 2. Determinación de margen de ganancia y margen de fase sobre las trazas de Bode. [13]	13
Figura 3. Diagrama de bloques simplificado del lazo de regulación de tensión en circuito abierto “Modelo 1”.	17
Figura 4. Respuesta al escalón unitario del sistema del modelo 1.	18
Figura 5. Trazas de Bode del Modelo 1.	19
Figura 6. Diagrama de bloques con compensador de adelanto con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.	21
Figura 7. Trazas de Bode por compensación de adelanto con base a respuesta en frecuencia – Modelo 1.	21
Figura 8. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.	22
Figura 9. Trazas de Bode y cruces de ganancia para el sistema del modelo 1.	24
Figura 10. Diagrama de bloques con compensador de atraso con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.	25
Figura 11. Trazas de Bode por compensación de atraso con base a respuesta en frecuencia – Modelo 1.	26
Figura 12. Respuesta escalón unitario con compensación por atraso con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.	27
Figura 13. Localización de las raíces del sistema del modelo 1.	29
Figura 14. Diagrama de bloques para el diseño del filtro de adelanto mediante la técnica de LGR.	29
Figura 15. Localización del polo deseado en lazo cerrado.	30
Figura 16. Método 1 para la determinación del polo y cero de una red de adelanto diseñado con base a LGR.	32
Figura 17. Diagrama de bloques con compensador de adelanto por método 1 con base a LGR - Modelo 1.	33
Figura 18. Localización de las raíces por compensación de adelanto por el método 1 con base a LGR – Modelo 1.	34
Figura 19. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto por método 1 con base LGR - Modelo 1.	35
Figura 20. Diagrama de bloques con compensador de adelanto por método 2 con base a LGR - Modelo 1.	37
Figura 21. Localización de las raíces por compensación de adelanto por el método 2 con base a LGR – Modelo 1.	37
Figura 22. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto por método 2 con base LGR - Modelo 1.	38
Figura 23. Diagrama de bloques con compensador de atraso con base a LGR - Modelo 1.	40
Figura 24. Localización de las raíces por compensación de atraso con base a LGR – Modelo 1.	41
Figura 25. Respuesta escalón unitario con compensación por atraso con base LGR - Modelo 1.	42
Figura 26. Diagrama de bloques compensador de adelanto por método 2 con base a LGR y planta original.	43
Figura 27. Diagrama de bloques con compensador de adelanto-atraso con base a LGR - Modelo 1.	44
Figura 28. Localización de las raíces por compensación de adelanto-atraso con base a LGR – Modelo 1.	44
Figura 29. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto-atraso con base LGR - Modelo 1.	45
Figura 30. Diagrama de bloques del modelo dinámico de la maquina síncrona “Modelo 2”.	46
Figura 31. Diagrama de bloques del sistema reducido del modelo 2.	47
Figura 32. Curva de respuesta ante la perturbación al escalón unitario del sistema del modelo 2.	47
Figura 33. Trazas de Bode para el sistema reducido del modelo 2.	48
Figura 34. Diagrama de bloques con compensador de adelanto con base a respuesta en frecuencia - Modelo 2.	50
Figura 35. Trazas de Bode por compensación de adelanto con base a respuesta en frecuencia – Modelo 2.	51
Figura 36. Curva de respuesta ante la perturbación para el modelo 2 compensado por adelanto con base a respuesta en frecuencia.	52
Figura 37. Localización de las raíces para el sistema reducido del modelo 2.	53
Figura 38. Diagrama de bloques con compensador de adelanto con base a LGR - Modelo 2.	54
Figura 39. Localización de las raíces por compensación de adelanto con base a LGR – Modelo 2.	55
Figura 40. Curva de respuesta ante la perturbación para el modelo 2 compensado por adelanto con base a LGR.	56

RESUMEN

En un sistema eléctrico de potencia (SEP), las unidades de generación encargadas de transformar un tipo de energía (normalmente mecánica debida al movimiento del caudal del agua o empuje del vapor proveniente de una turbina) a energía eléctrica, generalmente se ven sometidas a perturbaciones y/o fallas que implican tomar medidas preventivas para el buen desempeño del sistema. Para ello, estas unidades cuentan con dispositivos de protección y control cuyo principal objetivo es disminuir el riesgo asociado a estas contingencias inherentes a la operación de las máquinas. Estos dispositivos deben estar debidamente calibrados para ejercer un buen desempeño aumentando la eficiencia del sistema, reduciendo pérdidas y prolongando la vida útil de las máquinas.

Debido a la evolución de la estructura del sistema eléctrico los avances tecnológicos y nuevas técnicas de control, han hecho que el desarrollo del SEP se de en simultaneo con las nuevas tecnologías que innovan día a día e influyen positivamente el panorama del mercado eléctrico, sin embargo, es típico encontrarse con grandes y robustas maquinas síncronas que proveen energía eléctrica al trabajar como generadoras, maquinaria que aun teniendo cierta antigüedad poseen características que pueden ser mejoradas, para ello estas cuentan con dispositivos como el AVR, gobernadores de velocidad , PSS, entre otros, que mediante técnicas de control y una correcta sintonización mejoran la eficiencia del sistema en general, reduciendo así costos, minimizando pérdidas y contribuyendo a mejorar la estabilidad del mismo; todo esto ante perturbaciones ocurridas en los sistemas de potencia.

Entre estos dispositivos que conforman la máquina síncrona, el AVR cumple la función de controlar la corriente inyectada en el devanado de campo, modificando la tensión del rotor y por consiguiente la tensión de salida en el estator. Ante variaciones de potencia de la carga atendida por el generador, el AVR actúa controlando la tensión de la máquina evitando grandes variaciones en la misma que provoquen graves afectaciones en la máquina y/o carga.

Cuando se presentan perturbaciones en el sistema y el control de tensión realizado por el AVR no es suficiente para amortiguar los efectos indeseados ocasionados en las máquinas y en la red, se cuenta con redes de compensación que se ubican en el lazo de regulación de tensión y cumplen la función de mejorar la respuesta transitoria y de estado estable de la máquina, bajo ciertos requerimientos específicos en el dominio del tiempo, como tiempos de establecimiento, sobre oscilación y error en régimen permanente. Estas redes requieren una sintonización adecuada mediante técnicas y metodologías de control; en este trabajo se implementan técnicas clásicas como respuesta en frecuencia y lugar geométrico de las raíces. Estas técnicas cuentan con un enfoque diferente pero siempre buscando abordar la problemática de la sintonización de controladores y redes de compensación de una manera eficaz que contribuya al mejoramiento del sistema en cuestión, para este caso, la respuesta de la máquina ante contingencias en el SEP.

Se implementan las técnicas de control clásicas mencionadas anteriormente para el diseño de redes de compensación de adelanto, atraso y adelanto-atraso con el objeto de mejorar el comportamiento de la respuesta en el tiempo de un modelo de segundo y tercer orden de la máquina síncrona utilizando la herramienta MATLAB y SIMULINK. Se añaden los compensadores en el lazo de regulación de tensión de la máquina verificando la utilidad de las técnicas al mejorar la respuesta transitoria y de estado estacionario del sistema. Por último, se concluyen las ventajas y desventajas de cada red de compensación y las diferencias entre las metodologías de control aplicadas en la regulación de tensión de los modelos del generador estudiados.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La continuidad de entrega del suministro de energía eléctrica a nivel mundial se ha convertido en una necesidad, tanto para los usuarios no regulados como regulados dado el gran crecimiento de la demanda en la actualidad. En Colombia, el abastecimiento constante de la energía eléctrica es una obligación que toda empresa prestadora de dicho servicio debe cumplir bajo unos estándares de calidad, seguridad y confiabilidad bien definidos. Para ello se requiere que un SEP (Sistema eléctrico de potencia) robusto que sea capaz de dar abasto a la demanda energética y a su vez, ser capaz de soportar las adversidades a las cuales este se ve sometido como fallas y perturbaciones provocadas por fenómenos naturales y factores intrínsecos a la operación del mismo. [1]. En esencia las máquinas de las diferentes centrales de generación sufren un fuerte impacto en su dinamismo al hallarse el sistema de potencia constantemente sometido a perturbaciones y contingencias, puesto que, al estar operando en un sistema interconectado, su sincronismo se ve afectado y así mismo la estabilidad del sistema en general.

Como medida de prevención a cambios bruscos en las variables eléctricas de las máquinas provocadas por perturbaciones en el SEP, los generadores cuentan con sistemas de control como el AVR, que contribuye a atenuar la variación en la tensión de salida, manteniendo está dentro de unos límites permisibles sin afectaciones en la máquina, cargas y red. [2]. Con el ánimo de ajustar este control minimizando las deficiencias que presente ante grandes perturbaciones en la red y aumentar el desempeño del mismo, se altera este sistema añadiendo un componente llamado compensador. Este proceso se denomina compensación y se realiza con filtros o redes de adelanto, atraso y adelanto-atraso. Estos compensadores son dispositivos físicos que pueden ser eléctricos, neumáticos, mecánicos, etc; los cuales se comportan según una función de transferencia deseada. Para propósitos de este documento, solo se implementa la compensación en serie o cascada, añadiendo la red diseñada en el camino directo del sistema de control o lazo de regulación de tensión.

La utilidad de las redes de compensación y de la compensación misma, se puede observar del hecho de poder modificar las características de funcionamiento del sistema de manera externa, sin modificar las características físicas de la planta, ya que en la mayoría de los casos sus propiedades son inalterables. El compensador está conformado por los elementos que modifican dichas características de tal manera que el sistema cumpla con las especificaciones deseadas [3].

En esencia, se busca aprovechar las posibilidades de mejora de la respuesta que cada una de estas redes puede darle a un sistema en lazo cerrado. En función de las necesidades que se presenten, se cuenta con las siguientes redes de compensación: Red de Adelanto, la cual, en esencia, produce un mejoramiento en la respuesta transitoria del sistema y un pequeño cambio en la precisión en estado estable. La red de atraso produce una mejora notoria en la precisión en estado estable, sin embargo, aumenta el tiempo de respuesta transitoria y la red Adelanto-atraso combina las características de ambas compensaciones. Implementar una red de adelanto o atraso incrementa en 1 el orden del sistema volviéndolo más complejo, y difícil de controlar la dinámica del mismo; [4].

Cuando se implementan estos dispositivos de compensación en el sistema, Se modifica la función de transferencia, permitiendo a estos elementos interactuar con la salida del mismo, Por tal motivo se requiere encontrar unos valores óptimos que no sobredimensionen la compensación del sistema. Esto implica la utilización de técnicas de control de sintonización de parámetros. [5]

Técnicas como respuesta en frecuencia, donde este término hace referencia a la respuesta de un sistema en estado estable ante una entrada sinusoidal; donde esta no es más que una representación de la magnitud y fase de la función de transferencia del sistema, en función de la frecuencia angular. El sistema en cuestión

debe ser LTI (Lineal e invariante con el tiempo); esto es, ante una entrada sinusoidal, su salida en estado estable será una onda sinusoidal de igual frecuencia; pero en general la amplitud y fase serán diferentes de las de la entrada. [6]

Otra de las técnicas se denomina Método del Lugar de las raíces. Este es un método gráfico para visualizar la posición de los polos del sistema en el plano complejo variando un parámetro en específico; generalmente una constante K . En el diseño de compensadores, cuando se requieren obtener ciertas especificaciones en términos del dominio del tiempo, como amortiguamiento relativo, frecuencia natural no amortiguada, sobre elongación o tiempos de establecimiento, con esta técnica se puede reconstruir el Lugar geométrico de las raíces (LGR) haciendo que unos nuevos polos dominantes deseados se ubiquen dentro del LGR, obteniendo así los resultados en el dominio del tiempo deseados. [6]

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al sin número de contingencias que se presentan en los sistemas de potencia, y la alta incertidumbre en cuanto a los tipos y modos de falla, se ve afectada en gran medida la estabilidad del mismo.

En la industria minero energética, la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica que componen respectivamente al sistema eléctrico de potencia (SEP), requiere que este cumpla con normas de calidad, confiabilidad y seguridad. Para ello, es necesario mantener la tensión y frecuencia de red bajo márgenes nominales exigidos por la norma técnica colombiana RETIE [1]. Para lograr tales características es necesario tener sistemas de control bien calibrados que logren un balance óptimo de voltaje y generación/carga para una correcta operación del SEP. Sistemas como los reguladores automáticos de tensión (A.V.R por sus siglas en inglés Automatic Voltage Regulator) encontrados en los generadores síncronos, se encargan de mantener los niveles de voltaje dentro de la curva de operación predefinida. Para realizar esta función, el AVR ajusta continuamente los niveles de corriente de campo entregados a los devanados del estator del generador. [7] Sintonizar correctamente los equipos de control permite prevenir fallos y mitigar posibles perturbaciones que pueden llevar al colapso el SEP, esto es, mejorando la estabilidad del sistema, además de garantizar un mejor desempeño y demás características que este debe de cumplir.

Hoy en día existen técnicas de control de tensión muy avanzadas para la sintonización de los A.V.R, técnicas que por falta de la tecnología y maquinaria necesaria no son de fácil aplicación en la industria energética. Métodos avanzados como lo son: algoritmos de redes neuronales, algoritmos genéticos o Deep learning; aunque mucho más eficientes, pueden no ser de mucha utilidad o aplicativo en las centrales hidráulicas y térmicas debido a la antigüedad de las máquinas y falta de tecnologías.

Por lo que no se cuenta con un documento en el que se encuentre a detalle y de fácil entendimiento los diferentes métodos tradicionales que son usados para sintonizar generadores síncronos, métodos que aún son muy utilizados en centrales de generación, conocidos normalmente por los ingenieros de dicho campo y que las nuevas generaciones de ingenieros aprenden normalmente en la práctica directa cuando entrar a laborar en este campo. Por tal motivo se expone en este documento, algunas técnicas de control clásicas como respuesta en frecuencia y lugar geométrico de las raíces (LGR) para el ajuste de compensadores como redes de adelanto, atraso y adelanto-atraso.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Presentar una guía que exponga los distintos métodos clásicos de control de tensión para la sintonización de los A.V.R de los generadores síncronos. Modelar estos dispositivos, su respectivo control y simular la respuesta escalón unitario.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio de la teoría clásica de control de tensión, sistemas de generación de energía, A.V.R y ajuste de controladores.
- Caracterizar las distintas metodologías tradicionales para la sintonización de un A.V.R.
- Modelar mediante la herramienta de Simulink de Matlab, el sistema de generación compuesto por la maquina síncrona y su respectivo A.V.R, como el sistema de control a utilizar.
- Analizar la respuesta escalón unitario de la planta con y sin controlador de tensión.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos básicos de la máquina síncrona, su circuito de campo y la funcionalidad del AVR (regulador automático de tensión).

También se describen algunas de las técnicas clásicas de control y su implementación para la sintonización de los parámetros de ajuste del regulador automático de tensión en los generadores síncronos.

Debido al incremento de la conexión de generación de diferentes fuentes y a los diferentes tipos de perturbaciones que se presentan en los sistemas de potencia, se genera un gran impacto tanto en la generación de la energía como en la estabilidad general de todo sistema. El sistema de potencia presenta la característica de ser imperfecto, esto es, que es susceptible a un sin número de fallas las cuales conducen el sistema de potencia a presentar inestabilidad, en otras palabras, llegar a un colapso del mismo. Por tal motivo se hace indispensable garantizar un sistema de potencia confiable, con las mejores condiciones de adaptabilidad antes estas perturbaciones, haciendo del estudio de la estabilidad, tanto de frecuencia como transitoria, un factor de gran importancia, sino uno de los más importantes de los sistemas de potencia en general.

Otro aspecto importante además del estudio de la estabilidad transitoria y de frecuencia en los sistemas de potencia, es el de las protecciones. El estudio de estos va de la mano con el objetivo de mantener un sistema estable, eficiente y con las mínimas pérdidas en todo el sistema en general. Bien se puede hacer la apreciación de que, en términos de pérdidas, se habla acerca de las que se presentan a lo largo de todo el sistema, desde la generación de la energía, hasta su transmisión y distribución a los usuarios finales.

Hablando en términos de estabilidad, el constante crecimiento de la matriz energética de una sociedad o país en general, tanto como la demanda del mismo, requieren de un sistema más confiable y flexible que opere bajo ciertas condiciones de operación normales y establecidas previamente. Uno de los principales problemas que se tienen en contraposición a esto, es la variación de carga en cualquier instante de tiempo vista desde los generadores. Bien se sabe que el sistema de generación en anillo, opera en sincronismo y para que ocurra un colapso total, la frecuencia del sistema debe salir de su banda de operación normal, produciéndose esto, de manera fácil y remota gracias a dicha variación de carga. Esta alteración afecta directamente los generadores, provocado por el desbalance entre la potencia demandada y la potencia

entregada, haciendo que, de esta manera, el ángulo del par del rotor aumente o disminuya drásticamente, y dada la gran inercia de la máquina, se produzca el colapso del sistema.

En resumen, garantizar la estabilidad de un sistema de potencia, es una tarea ardua y compleja que requiere el estudio de gran cantidad de variables y campos, estos últimos como algunos de los mencionadas anteriormente, extendiendo enormemente el problema general, así pues, en este documento solo se tratará una pequeña parte; el control clásico aplicado en los generadores síncronos para cierta variable determinada.

2.1 DEFINICIÓN

Se puede determinar que un sistema eléctrico de potencia es estable si este es capaz de mantener o recuperar su estado de sincronismo después de ser sometido a cualquier tipo de perturbación. [8] Retomando su estado de operación normal luego de perturbaciones como variaciones drásticas de carga, salidas de elementos, tales como transformadores, líneas de transmisión, subestaciones, entre otros. finalmente, cortocircuitos a lo largo del sistema son algunos de los más comunes.

Por lo tanto, el problema de estabilidad debe ser abordado desde la premisa de que el sistema está en constante cambio y estas alteraciones a las que se ve sometido, se ven reflejadas en mayor medida en los generadores.

2.2 PROBLEMA DE ESTABILIDAD EN LOS GENERADORES

La principal característica que presentan los generadores dentro de un sistema de potencia, es su capacidad de operar en sincronismo y poder recuperar este estado dentro de ciertos límites operativos normales luego de sufrir perturbaciones. Esta capacidad de “recuperarse” depende arduamente de los parámetros internos de la máquina síncrona, así como de sus controladores, los cuales deben de estar debidamente sintonizados para poder efectuar tal acción y así devolver la máquina a un estado funcionamiento normal, de no ser este el caso se corre el riesgo en que el generador, así como el SEP (sistema eléctrico de potencia) entren en un estado transitorio del cual no sea posible retornar y se produzca una falla que dependiendo de su magnitud pueda producir sobre excitaciones o sub excitaciones que deriven ya sea en daños a equipos eléctricos (incluida la máquina generadora), interrupciones del suministro de energía eléctrica o incluso la desconexión sectorizada de la red eléctrica de potencia. [9]

Debido a lo anterior, mantener un control adecuado sobre la máquina se hace de vital importancia más para ello, se ha de conocer cómo funciona la máquina síncrona y sobre todo las partes en las cuales actúan los controladores.

2.3 MÁQUINA SÍNCRONA

Una máquina síncrona está compuesta esencialmente por dos partes principales, el estator o armadura y el rotor, estos son los encargados de convertir cualquier tipo energía (normalmente mecánica de naturaleza cinética) en energía eléctrica. El principal problema que se presenta en el generador es el desbalance entre la potencia que entrega y la que es demandada, ya que cualquier perturbación en el sistema, genera este cambio de potencia. Cabe resaltar que entre mayor y más grave sea la perturbación, salida de elementos, cargas, cortocircuitos, entre otros, el desbalance de estas potencias será mayor y por consiguiente la máquina experimentará un golpe fuerte en su dinamismo.

Dependiendo de la configuración y disposición del rotor como de la armadura, se pueden encontrar máquinas síncronas de campo giratorio, de armadura giratoria o de imanes permanentes, todos estos basados bajo el mismo principio de generación que es la ley de inducción de Faraday. Para la generación de energía eléctrica, la máquina más usada es el alternador síncrono de campo giratorio debido a que, al tener armadura

fija, los bornes en la salida de tensión son mucho más fáciles de acoplar como de aislar. Este alternador síncrono requiere una excitación DC para funcionar, para ello se utiliza un motor externo llamado excitatriz cuya función es brindar y entregar corriente continua al devanado de campo para que así, este pueda empezar a operar. [10]

2.4 SISTEMAS DE EXCITACIÓN

La función principal del sistema de excitación como actor fundamental en el correcto funcionamiento de la máquina, es suministrar la corriente continua requerida por el devanado de campo y así mismo realizar funciones de control y protección sobre la misma. Monitoreo constante de la tensión de salida del generador, flujos de potencia reactiva y límites de capacidad de la máquina son algunas de las funciones que debe proporcionar este sistema. [8]

los excitadores se encuentran generalmente tanto en CC como en CA, en estos últimos se utilizan diodos estacionarios para rectificar la señal y así poder garantizar que se entrega corriente directa al devanado de campo, además de eso requieren el uso de escobillas y colectores para realizar el acoplamiento entre el estator y rotor de la maquina excitadora lo que aumenta las perdidas por efecto joule y requiere mayor mantenimiento por el desgaste de las partes mecánicas. [8]

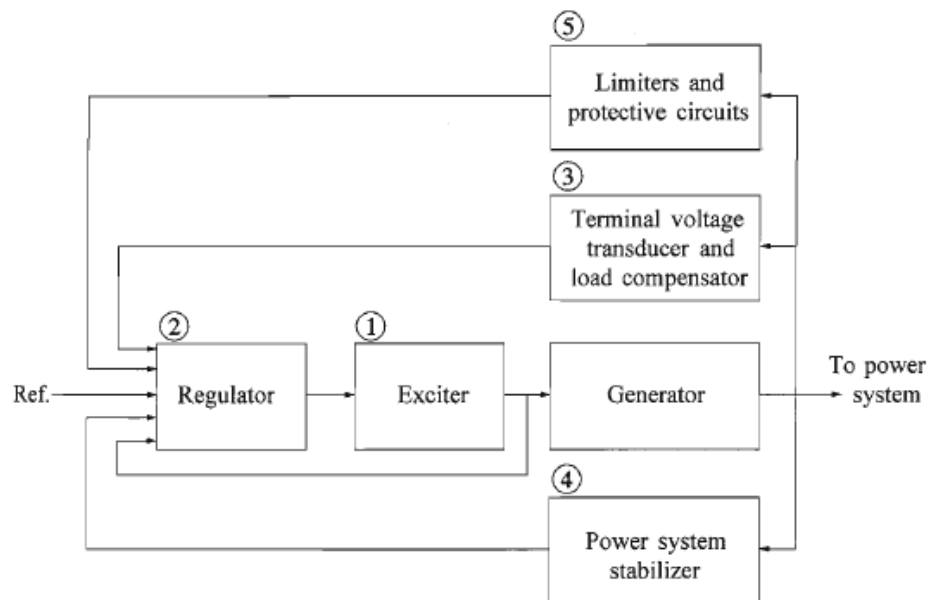


Figura 1. Esquema del sistema de excitación de un generador síncrono. [8]

Conformado por el excitador, el cual se encarga de proveer la potencia DC al devanado de campo. Un regulador cuya función es estabilizar y regular los niveles de tensión que se entregan al devanado inducido. Este regulador recibe varias señales de entrada desde diferentes dispositivos, entre ellos un transductor de tensión que censa la señal de tensión de salida en el devanado inductor, realizando el debido tratamiento, rectificándola y filtrándola para ser operada por el regulador del sistema con el fin de comparar la señal con una referencia determinada. Una señal del power system stabilizer “estabilizador de sistemas de potencia” con el objetivo de detectar y amortiguar oscilaciones en el sistema. En última instancia una señal de circuitos protectores y limitadores, que le indica al regulador, que los límites de operación de algunas de las variables

más importantes del sistema de excitación y del generador no están siendo excedidos, es decir, están actuando bajo operación normal. [8]

2.5 REGULADOR AUTOMÁTICO DE Tensión (AVR)

El regulador automático de tensión (AVR) es un sistema que permite regular la tensión del generador de manera automática, esto lo logra censando de forma continua la tensión de salida y corrigiendo la corriente de excitación que entra al devanado del campo del generador síncrono con el fin de mantener la tensión de salida en los rangos admisibles por la red. El regulador automático de tensión actúa directamente en la excitación del campo del generador, censando los cambios del flujo de voltaje, compara el voltaje de salida del generador con la referencia establecida y así, este aumenta o disminuye la corriente en la excitatriz de la máquina (normalmente mediante electrónica de potencia usando tiristores como triacs o SCRs) para corregir el error y volver a valores nominales de operación en la tensión de salida. [10]

Constantemente se ve afectado por variaciones de demanda de potencia activa y reactiva y demás factores externos, por lo cual el regulador se encuentra actuando constantemente sobre la máquina. Anteriormente se encontraban reguladores mecánicos, menos eficientes y más lentos en cuanto a sus tiempos de respuesta. Con el tiempo fueron evolucionando a electrónica analógica y por último a electrónica digital, permitiendo estos últimos un mayor número de funciones. [11]

Debido a lo expuesto anteriormente, el regulador automático de tensión debe estar en óptimas condiciones de funcionamiento y contar con un adecuado ajuste de sus parámetros con el objetivo de realizar su función de regulación de la manera más eficiente posible, aumentando su rapidez y precisión. El ajuste de sus parámetros se realiza por medio de diferentes técnicas de control con el objetivo de sintonizar sus variables a puntos de funcionamiento adecuados. Técnicas clásicas de control como los filtros de compensación adelanto-atraso, técnicas de respuesta en frecuencia y método de ubicación de las raíces

CAPITULO 3. TÉCNICAS Y METODOLOGIAS CLASICAS DE CONTROL

El control de tensión en las máquinas síncronas es de vital importancia debido a que de este depende la estabilidad del sistema eléctrico de potencia. Para ello se han creado esquemas y técnicas de control para estos dispositivos, que permiten, no solo estabilizar un sistema si este es previamente inestable, si no también, mejorar la respuesta transitoria de una planta ante diferentes tipos de perturbaciones, haciéndola más rápida y menos oscilatoria, o adecuada a los distintos requerimientos que pueda demandar un sistema para su buen funcionamiento.

Las técnicas mencionadas a continuación tienen diferentes enfoques que buscan abordar la problemática del sistema, la cual es mejorar la respuesta transitoria y estabilidad del sistema, para ello utilizan metodologías como lo es observar el comportamiento en el dominio de la frecuencia (Diagramas de Bode), observar y caracterizar la función de transferencia de la misma (Ubicación de las Raíces), esto, para dar al diseñador valiosa información de la planta y así brindar un punto de partida para saber qué tipo de controlador o técnica de control usar, como por ejemplo un filtro de compensación ya sea de adelanto (Lead), atraso (Lag) y/o combinado (Lag Lead).

3.1 TÉCNICAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA – DIAGRAMAS DE BODE

Los diagramas de bode son técnicas que sirven para caracterizar la respuesta de un sistema brindando así el comportamiento del mismo, permiten observar su función de transferencia, así como la relación entre las ganancias de control y frecuencias de corte de una planta. Relaciones que pueden dar paso a distintos tipos de respuesta (como por ejemplo del tipo: sobre amortiguado, sub-amortiguado o críticamente amortiguado) en donde se busca que sea rápida, con las más mínimas oscilaciones y que, además, puede ser escogida de acuerdo a cuál tipo de respuesta se adapte mejor al desempeño del sistema. [12]

Cabe resaltar que existe una estrecha correlación entre el desempeño del dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia de un sistema lineal, brindando así, una manera de predecir las propiedades que se tienen en el dominio del tiempo basado en las características del dominio de la frecuencia. Especificaciones como margen de fase, margen de ganancia, ancho de banda y frecuencia de cruce de ganancia las cuales especifican el desempeño de la respuesta transitoria y la precisión en estado estable del sistema analizado de manera indirecta. [6]

El diseño de sistemas de control mediante técnicas de respuesta en frecuencia, implementa cálculos tanto analíticos como gráficos. A continuación, se muestran algunas especificaciones de las trazas de bode.

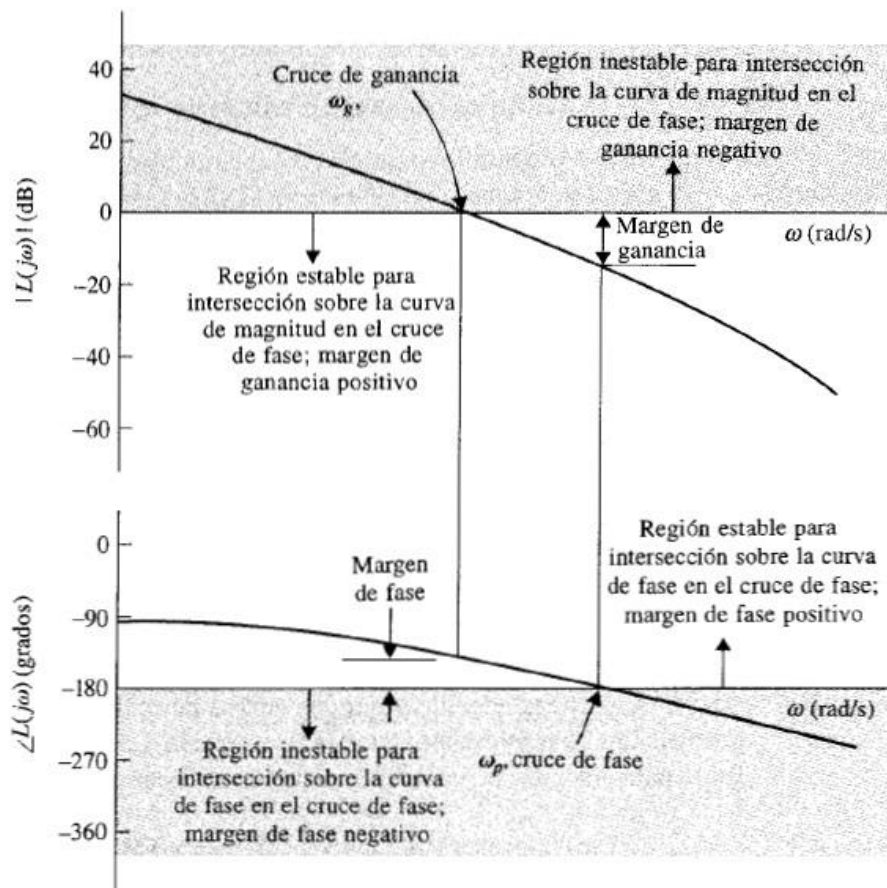


Figura 2. Determinación de margen de ganancia y margen de fase sobre las trazas de Bode. [13]

El margen de ganancia y margen de fase indican si el sistema en lazo cerrado es estable o inestable. Como se ilustra en la figura 2, el margen de ganancia se mide abajo del eje 0-dB, el margen de ganancia es positivo y el sistema es estable; del mismo modo, el margen de fase se mide arriba del eje -180°, el margen de fase es positivo y el sistema es estable. De ser medidos en sentidos contrarios, el sistema se considera inestable. [13]

Cuando se habla de sintonización de sistemas de excitación y diseño de sistemas de control, los diagramas de bode no son suficientes, para ello se complementa con otras metodologías cuyo fin es sincronizar una maquina bajo fundamentos matemáticos para obtener una respuesta lo suficientemente rápida y estable.

3.2 TÉCNICA DEL LUGAR DE LA RAÍCES - ROOT LOCUS

la metodología de la ubicación de las raíces (Root Locus) permite observar la función de transferencia y en más detalle observar sus polos y ceros, además busca caracterizar la función de transferencia para conocer de primera mano cómo es su posible comportamiento sin necesidad de graficar la respuesta, esto, conociendo que los polos afectan la estabilidad y los ceros afectan el dinamismo del sistema en general.

La técnica permite mapear la región en la cual el sistema se comporta tanto de forma estable como inestable variando los valores de las constantes de control y escogiendo de esta manera la respuesta más adecuada para planta; además de usar criterios de reducción del sistema como lo es el criterio de polos dominantes para facilitar el análisis matemático. [14]

Cabe mencionar que un sistema es estable si todos sus polos se encuentran en el semiplano izquierdo del plano complejo.

3.3 FILTRO LEAD

Un compensador de adelanto en general permite mejorar el amortiguamiento de la respuesta transitoria del sistema como la frecuencia natural y la dinámica de la misma, haciendo que la planta responda más rápido y aumente su amortiguamiento a costa de un pequeño cambio en el error de estado estable. [6]

Este compensador es un caso especial de un control PD, posee un comportamiento de un filtro pasa altas y, por tal motivo debe de usarse con cuidado ya que, a frecuencia mayores a la frecuencia de cruce del sistema, este tiende amplificar el ruido, además de aumentar en uno el grado del sistema y por consiguiente la complejidad del mismo.

El compensador de adelanto tiene la forma:

$$G_c(s) = K \frac{T_1 s + 1}{\alpha T_2 s + 1} = K_c \frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{1}{\alpha T_2}} \quad (3)$$

Donde:

K_c = es la constante proporcional del compensador.

α = es el factor de amortiguamiento.

$(s + 1/T_1)$ = es el cero del compensador ubicado en $-1/T_1$.

$(s + 1/\alpha T_2)$ = es el polo del compensador ubicado en $-1/\alpha T_2$.

El efecto que tiene el cero, es mejorar los tiempos de asentamiento y levantamiento, esto es, reducir o amplificar la oscilación debida al sobrepaso en la respuesta transitoria, por otro lado, el polo tiende a mejorar la velocidad de respuesta a costa de aumentar la oscilación de la misma, para ello el cero siempre se ubica a la derecha del polo y no tan cerca del origen para así no magnificar el sobrepaso, y el polo se procura ubicar a una distancia lejana al origen y cero (normalmente una década por debajo de esté) lo suficiente mente razonable para mejorar la velocidad de la respuesta sin desechar el efecto del polo (esto basado en el criterio de polos dominantes). [13]

Este compensador se puede diseñar basándose en distintos tipos de técnicas, entre estas, la técnica de respuesta en frecuencia (BODE) o técnica de lugar geométrico de las raíces (ROOT LOCUS).

El compensador de adelanto de fase (desde el punto de vista de BODE) permite mejorar la margen de fase de un sistema o planta mediante la suma de un desfase positivo que suele ser normalmente de hasta 65° , esto debido a las limitaciones de diseño basados en la respuesta en el dominio de la frecuencia.

El compensador de adelanto de fase (desde el punto de vista de ROOT LOCUS) permite mejorar la respuesta transitoria a partir de observar y escoger un polo de referencia en el grafico geométrico de las raíces (que puede que al principio no lo sea, pero es ajustable con el compensador), influenciando (positivamente o no) el dinamismo de la planta al ubicar el polo lejos del origen.

3.4 FILTRO LAG

Por otro lado, un compensador de retardo tiene como objetivo mejorar las características de respuesta en estado estable, sin afectar en lo posible la respuesta transitoria; esto se debe a que al ubicar un compensador de retardo, debido a la topología con la cual esta cuenta, se hace inevitable no alterar de manera negativa el dinamismo de la planta. El diseño del compensador busca corregir el error en estado estable a consta de alentar (lo menos que sea posible) la respuesta. Este tiene la forma:

$$G_c(s) = \hat{K}_c \beta \frac{T_1 s + 1}{\beta T_2 s + 1} = \hat{K}_c \frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{1}{\beta T_2}} \quad (3.1)$$

Donde:

\hat{K}_c = es la constante proporcional del compensador.

β = es el factor de amortiguamiento con $\beta > 1$.

$(s + 1/T_1)$ = es el cero del compensador ubicado en $-1/T_1$.

$(s + 1/\beta T_2)$ = es el polo del compensador ubicado en $-1/\beta T_2$.

El diseño de un compensador de retardo puede ser realizado con uso de distintos enfoques, y al igual que para un compensador de adelanto se cuenta con diseños basados en técnicas de respuesta en frecuencia (BODE) y técnica basados en el lugar geométrico de las raíces (ROOT LOCUS).

Mediante la respuesta en frecuencia, se busca corregir la margen de fase de la planta mediante la característica de compensación de retardo, esto es, atenuar las altas frecuencias aumentando así, la ganancia de fase desplazando el cruce de ganancia a una frecuencia más baja en donde el margen de fase sea más aceptable, esto implica disminuir el ancho de banda y por ende alentar la respuesta transitoria. Para ello en el diseño del mismo se busca ubicar el polo y el cero lo más cercanos posible, en donde el cero siempre se encuentra a la izquierda del polo para así, no aminorar la pérdida del dinamismo de la planta o sistema. [6]

Por otro lado, mediante la técnica del lugar geométrico de las raíces, busca incrementar la ganancia en lazo cerrado sin alterar notablemente el lugar geométrico de los polos dominantes en dicho lazo, esto con el fin de mejorar la respuesta en estado estable sin alterar de manera significativa la respuesta transitoria del sistema. [6]

3.5 FILTRO LEAD-LAG

Un compensador de adelanto y atraso o compensador lead-lag busca obtener las dos características principales de cada compensador por individual y sumarlas en uno solo, esto es mejorar la respuesta transitoria así como el error en estado estable, para ello se busca llegar a un compromiso entre estas dos características, debido a que ambos son requerimientos incompatibles, se debe equilibrar el sistema para que se acerque lo más posible a cumplir las exigencias que demanda el sistema para su correcto funcionamiento, este tiene la forma: [6]

$$G_c(s) = K_c \frac{\beta}{\gamma} \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{\left(\frac{T_1}{\gamma} s + 1\right)(\beta T_2 s + 1)} = K_c \left(\frac{s + \frac{1}{T_1}}{s + \frac{\gamma}{T_1}} \right) \left(\frac{s + \frac{1}{T_2}}{s + \frac{1}{\beta T_2}} \right) \quad (3.2)$$

Donde:

K_c = es la constante proporcional del compensador.

γ y β = Son los factores de ajuste del compensador Lag-Lead, con γ y $\beta > 1$.

$(s + 1/T_1)$ = es el cero del compensador ubicado en $-1/T_1$ para la parte de atraso

$(s + 1/T_2)$ = es el cero del compensador ubicado en $-1/T_2$ para la parte de adelanto

$(s + \gamma/T_1)$ = es el polo del compensador ubicado en $-\gamma/T_1$ para la parte de atraso.

$(s + 1/\beta T_2)$ = es el polo del compensador ubicado en $-1/\beta T_2$ para la parte de adelanto.

Al igual que los compensadores mencionados anteriormente, la compensación Lag-Lead se puede diseñar basados en técnicas de respuesta en frecuencia como en técnicas del lugar geométrico de las raíces

CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CONTROL Y SINTONIZACIÓN DE SISTEMAS DE EXCITACIÓN.

El principal objetivo del control realizado sobre un sistema de excitación es obtener una respuesta lo suficientemente rápida y estable con el menor sobrepaso posible, lo cual se realiza mediante la aplicación de diferentes técnicas de control para, de esta manera, ajustar o sintonizar los parámetros del controlador a valores óptimos. En una máquina síncrona el control de tensión es realizado por el AVR, actuando directamente sobre la excitación, censando la tensión de salida del generador y los flujos que presenta, comparándolo con una referencia establecida y ejecutando ordenes sobre la excitatriz del circuito de campo. No obstante, este control que realiza el AVR generalmente no es suficiente, por tal motivo para mejorar dicha regulación se implementan sistemas de compensación y técnicas de control como las mencionadas en el capítulo 4. [12]

Con lo mencionado anteriormente, la sintonización de los sistemas de excitación busca sincronizar una máquina síncrona apoyado en fundamentos matemáticos brindados en su mayor parte por las respuestas a pruebas de paso realizadas en lazo abierto, dicha sintonización se realiza cuando las respuestas obtenidas en el lazo de regulación presentan comportamientos oscilantes o tiempos de respuesta muy lentos. Las pruebas realizadas sobre la máquina y la sintonización de parámetros se realizan en lazo abierto ya que, en este estado, la máquina tiende a ser más inestable a comparación de cuando se encuentra conectada a una red, dado que al encontrarse conectada a un sistema de potencia o barraje infinito, el lazo de regulación de tensión se cierra y el sistema se vuelve más estable dada la poca variación en tensión y frecuencia del sistema. [12]

4.1 DISEÑO DE COMPENSADORES MEDIANTE TÉCNICAS DE RESPUESTA EN FRECUENCIA

Se implementa un modelo de segundo orden de la máquina síncrona. Las no linealidades son ignoradas y sus parámetros se especifican en [12]. A partir de este capítulo este modelo será llamado “Modelo 1”.

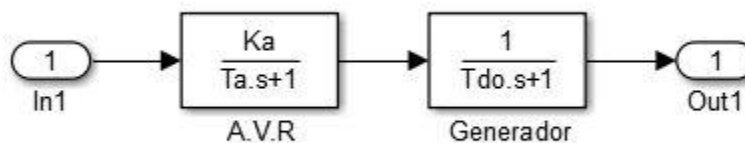


Figura 3. Diagrama de bloques simplificado del lazo de regulación de tensión en circuito abierto “Modelo 1”.

Para la figura 3 se muestra la función de transferencia obtenida:

$$G(s) = \frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \quad (4)$$

Con los parámetros seleccionados, se muestra la respuesta escalón unitario del sistema en lazo cerrado con el objetivo de analizar la estabilidad del mismo.

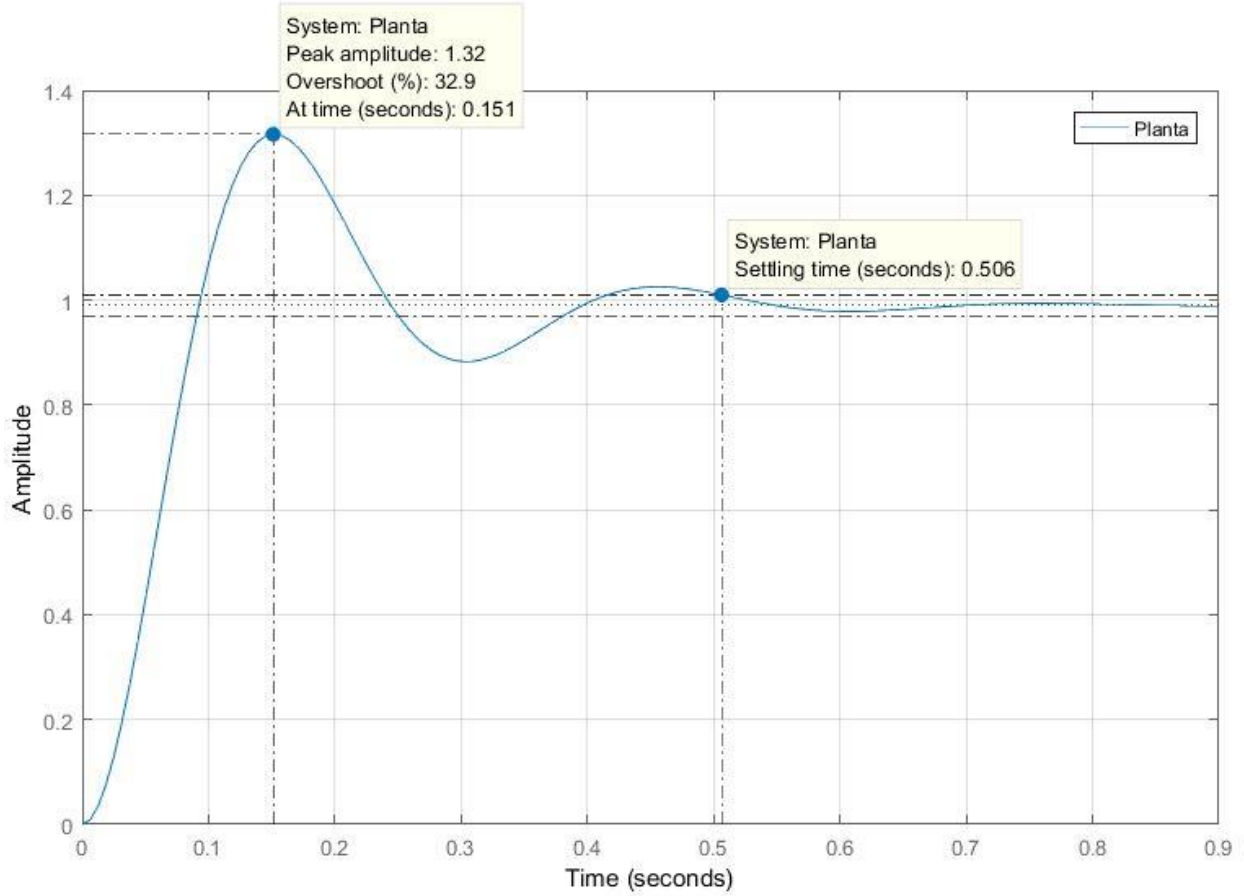


Figura 4. Respuesta al escalón unitario del sistema del modelo 1.

Se observa un sobrepaso del 32.9% y un tiempo de establecimiento de 0.506 s. Para mejorar el desempeño de esta respuesta, se implementan las técnicas de control estudiadas en el capítulo 4 con el objeto de diseñar las diferentes redes de compensación descritas en el mismo capítulo. Inicialmente se calcula el error de estado estacionario de la planta como se muestra:

$$E_p = \frac{1}{(1 + K_p)} \quad (4.1)$$

Donde K_p es la constante de error de posición y se determina haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad (4.2)$$

Donde $G(s)$ hace referencia a la función de transferencia de la planta (Modelo 1), así:

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right)$$

$$K_p = 100$$

Por consiguiente,

$$E_p = 0.99\%$$

4.1.1 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO POR RESPUESTA EN FRECUENCIA

Utilizando la metodología descrita en [6] se calculan los parámetros del compensador de adelanto cuya forma se observa en (4.1)

En primera instancia se obtiene el diagrama de bode en lazo abierto del sistema de la figura 4.

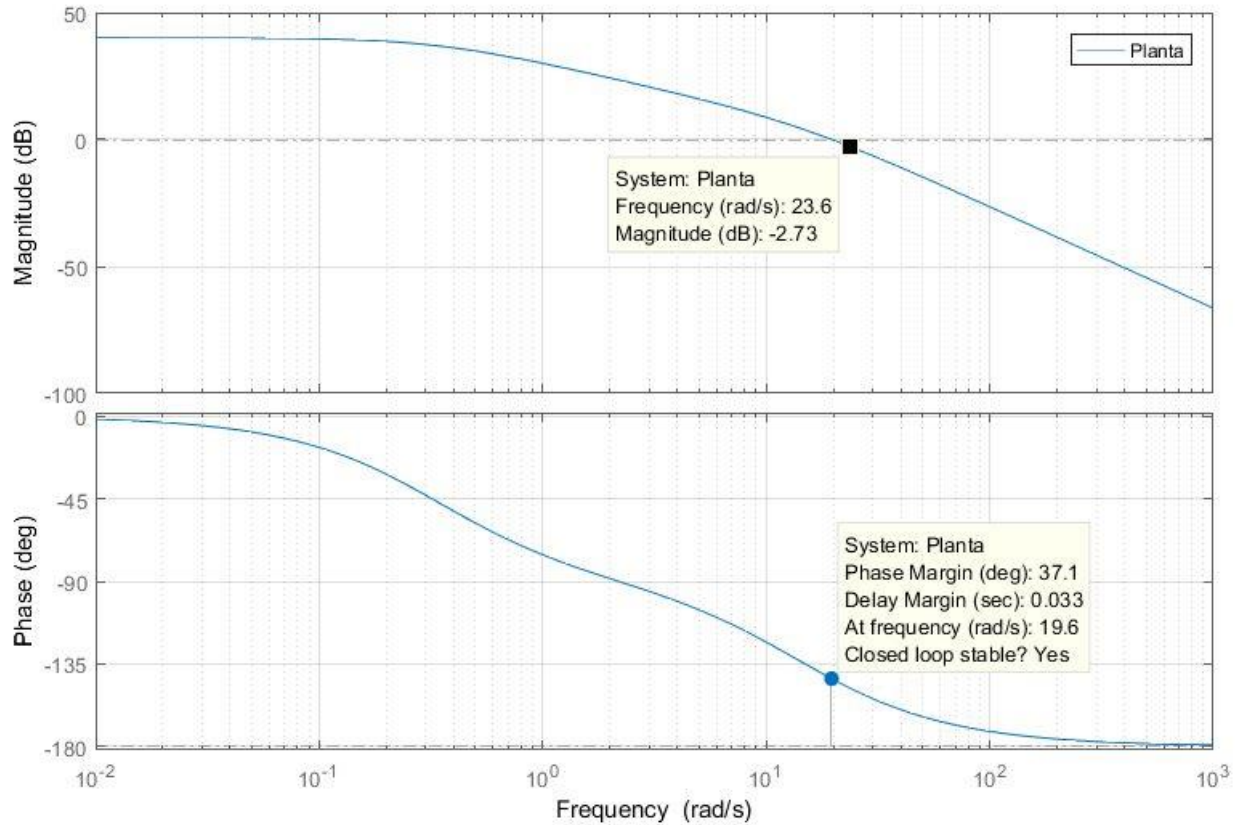


Figura 5. Trazas de Bode del Modelo 1.

A partir de las trazas de bode se observa los márgenes de ganancia y de fase del sistema y se determina que es necesario compensar el margen de fase a un valor deseado dentro del rango de 50 a 60 grados como se recomienda en [12] con el objeto de mejorar el desempeño de la planta. Del diagrama de fase se determina que el MF= 37,1°; por lo tanto, la red de adelanto debe contribuir con un adelanto de fase de 12,8° más 5° como margen de seguridad requerido, dando un total de una adición de fase de 17,8°.

Con este valor determinado se procede al cálculo del factor de amortiguamiento α por medio de la siguiente expresión:

$$\alpha = \left(\frac{1 - \sin(\theta)}{1 + \sin(\theta)} \right) \quad (4.3)$$

Donde θ es la adición de fase dada en radianes.

$$\alpha = \left(\frac{1 - \sin(17.8^\circ)}{1 + \sin(17.8^\circ)} \right)$$

$$\alpha = 0.5318$$

Con el valor de α se procede a calcular el aumento en la modificación del diagrama de magnitud por medio de la siguiente expresión:

$$M = -20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right) \quad (4.4)$$

$$M = -2.7428 \text{ dB}$$

En la traza de magnitud de la figura 6, se observa a esta cantidad “M”, qué valor de frecuencia corresponde y se selecciona como la nueva frecuencia de cruce de ganancia. Del diagrama se determina un valor de $w = 23.6 \text{ rad/s}$.

Con este valor se procede al cálculo de las frecuencias de esquina correspondientes al polo y cero del compensador como se observa:

$$T_1 = w\sqrt{\alpha} \quad (4.5)$$

$$T_1 = 16.8450$$

Frecuencia de izquierda correspondiente al cero de la red.

$$T_2 = \frac{T_1}{\alpha} \quad (4.6)$$

$$T_2 = 31.6777$$

Frecuencia de derecha correspondiente al polo de la red.

Por último, se calcula la constante proporcional del compensador “K”

$$K = \frac{1}{\alpha} \quad (4.7)$$

$$K = 1.8805$$

Con los valores obtenidos, se tiene el siguiente compensador de adelanto:

$$G_c(s) = 1.881 \frac{s + 16.8450}{s + 31.68} \quad (4.8)$$

Se agrega en cascada el compensador al lazo de regulación de tensión de la figura 3 “Modelo 1”

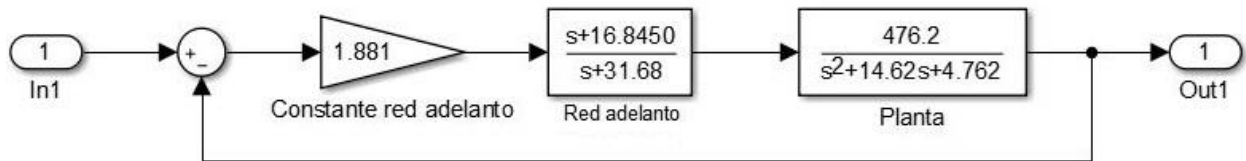


Figura 6. Diagrama de bloques con compensador de adelanto con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.

La figura 6 muestra el sistema resultante del diseño del compensador; se verifica mediante las trazas de bode un valor adecuado de margen de fase que garantice una mejora en la respuesta del sistema.

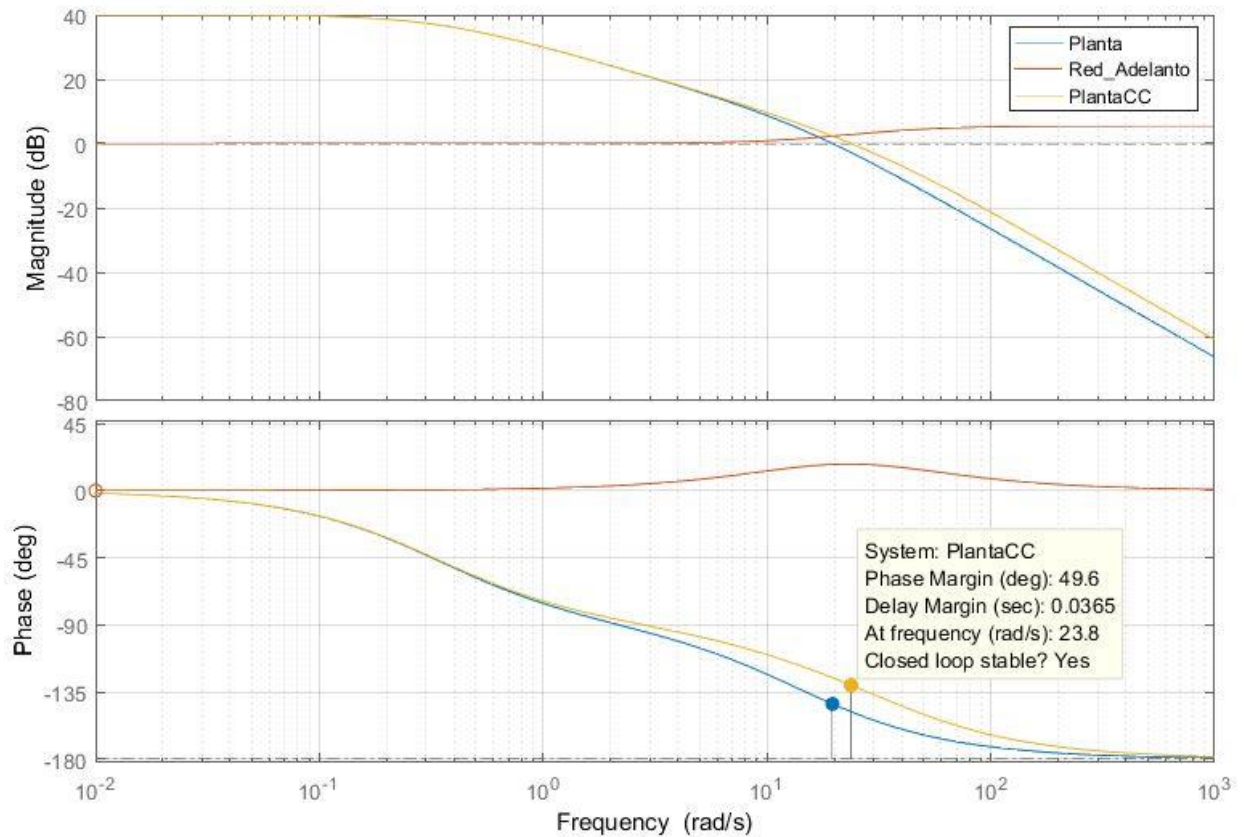


Figura 7. Trazas de Bode por compensación de adelanto con base a respuesta en frecuencia – Modelo 1.

De la figura 7 se observa en color azul el sistema inicial (Planta), en rojo el compensador de adelanto (Red_Adelanto) y en amarillo el sistema con el compensador en cascada (PlantaCC). Se puede apreciar un Margen de fase de $49,6^\circ$ obteniendo así un valor deseado.

Se procede a graficar las pruebas de paso para el modelo 1, de las cuales en la figura 8 se observa en color azul el sistema sin compensar (PlantaSC) y en color rojo el mismo sistema con el compensador en cascada (PlantaCC).

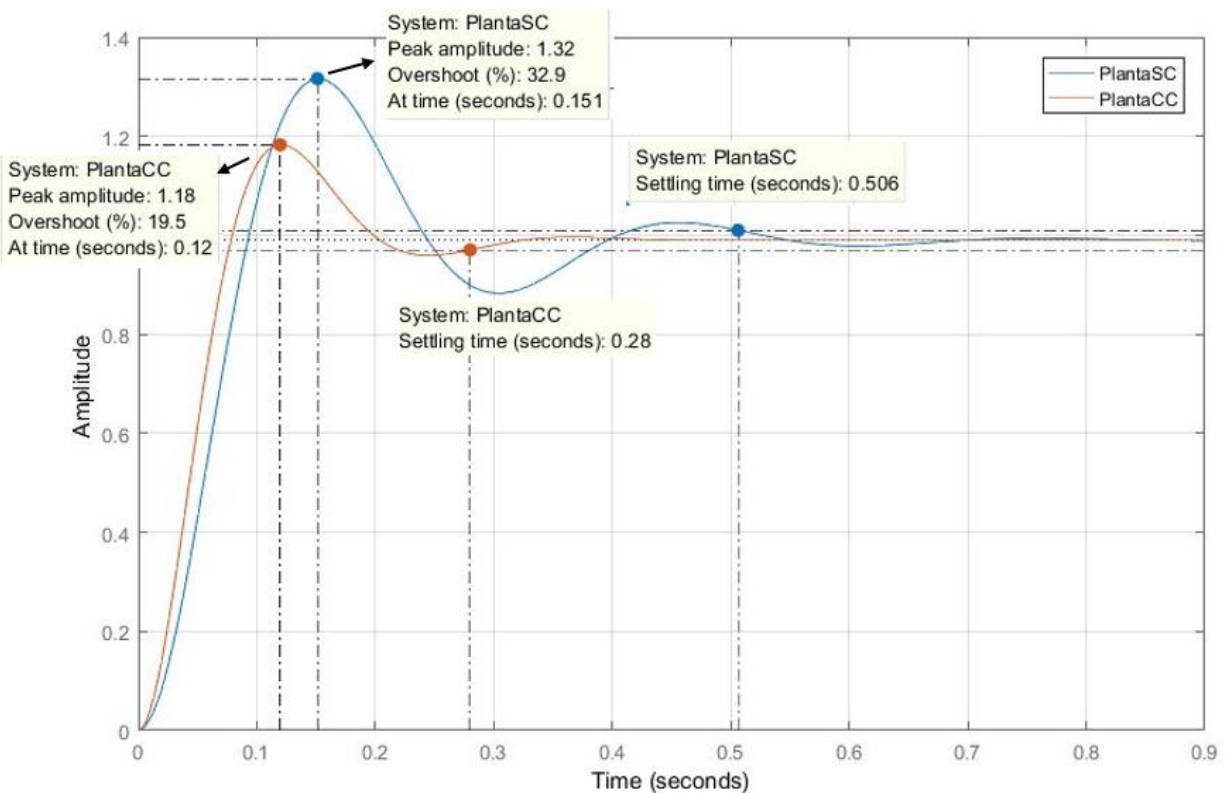


Figura 8. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.

De la figura 8 se puede observar una mejora notoria en el tiempo de establecimiento y sobrepaso los cuales en el sistema sin compensar tienen valores de 0,506 segundos y 32.9% respectivamente. Luego de haber realizado la sintonización y diseño de la red, se observa que estos valores cambian a 0,28 segundos de tiempo de establecimiento y un sobrepaso del 19%, lo que indica el correcto diseño y funcionamiento del compensador de adelanto, mejorando así la dinámica de la máquina, contribuyendo en la etapa transitoria de la respuesta.

4.1.2 DISEÑO COMPENSADOR DE ATRASO POR RESPUESTA EN FRECUENCIA

Utilizando la metodología descrita en [10] se calculan los parámetros del compensador de adelanto cuya forma se observa

$$G_c(s) = K \frac{Ts + 1}{\beta Ts + 1} \quad (4.9)$$

Con el diseño del compensador se busca aumentar la constante de error de posición a un valor de $K_p = 200$, con el objeto de mejorar el error de estado estacionario. Por medio de la ecuación (4.10) se puede encontrar la constante como se observa:

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} (K_c G_c(s) G(s)) \quad (4.10)$$

Aplicando (4.10) y despejando K_c obtenemos:

$$200 = \lim_{s \rightarrow 0} \left(K_c \left(\frac{Ts + 1}{\beta Ts + 1} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right) \right)$$
$$100K_c = 200$$

$$K_c = 2$$

Continuando con el procedimiento para el diseño de la red, se obtiene el diagrama de bode en lazo abierto del sistema de la figura 3.

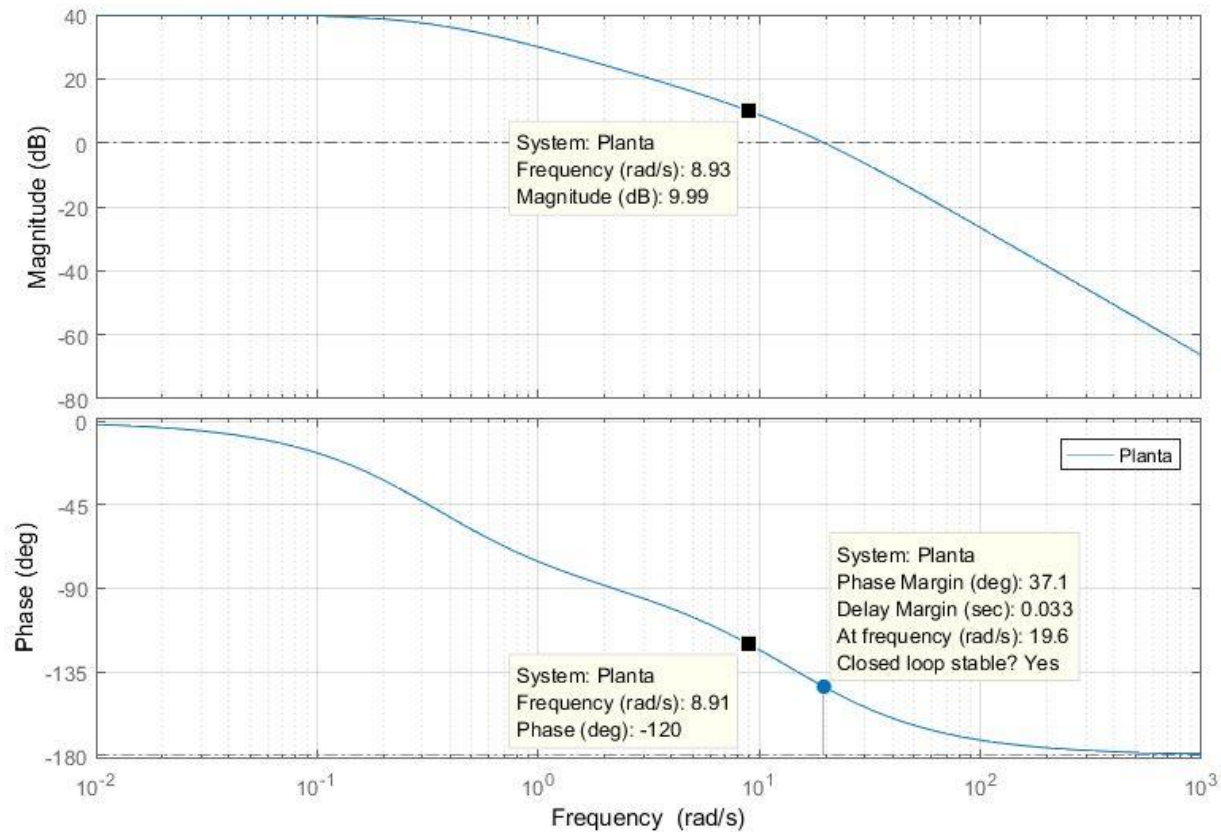


Figura 9. Trazas de Bode y cruces de ganancia para el sistema del modelo 1.

Del diagrama de fase de la figura 9 se aprecia un MF de $37,1^\circ$. Como se requiere un Margen de fase de por lo menos de 50° más 5° y 10° de margen adicional debido al cambio en la frecuencia, se determina del diagrama de fase la frecuencia a la cual se tiene un ángulo de fase de -120° donde este garantiza un MF entre 55° y 60° . Del gráfico se observa que dicha frecuencia es de $8,91 \text{ rad/s}$.

Esta será la nueva frecuencia de cruce de ganancia. Del gráfico de magnitud se observa que a esta frecuencia se tiene una magnitud de $9,87 \text{ dB}$, por lo tanto, la red de atraso deberá cumplir que:

$$-20 \log(\beta) = -9.87 \text{ dB}$$

$$\beta = 10^{\left(\frac{9.87}{20}\right)}$$

$$\beta = 3.1153$$

Siguiendo el procedimiento, se calculan las frecuencias de esquina, donde la frecuencia de izquierda $1/T$ debe estar entre una década y una octava por debajo de la nueva frecuencia de cruce de ganancia, por lo tanto, se tiene que:

$$T_1 = 0.9 \text{ rad/s}$$

Para la frecuencia de derecha se tiene:

$$T_2 = \frac{1}{\beta \frac{1}{T_1}} \quad (4.11)$$

$$T_2 = 0.2889 \text{ rad/s}$$

Por último, se calcula la constante proporcional del compensador “K”

$$K = \frac{K_c}{\beta} \quad (4.12)$$

$$K = \frac{2}{3.1153}$$

$$K = 0.6419$$

Con los valores obtenidos, se tiene el siguiente compensador de atraso:

$$G_C(s) = 0.6419 \frac{s + 0.9}{s + 0.2889} \quad (4.13)$$

Se agrega en cascada el compensador de atraso al lazo de regulación de tensión de la figura 3 “Modelo 1”, obteniéndose la figura 10.



Figura 10. Diagrama de bloques con compensador de atraso con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.

Se verifica mediante las trazas de bode un valor adecuado de margen de fase que garantice una mejora en la respuesta del sistema.

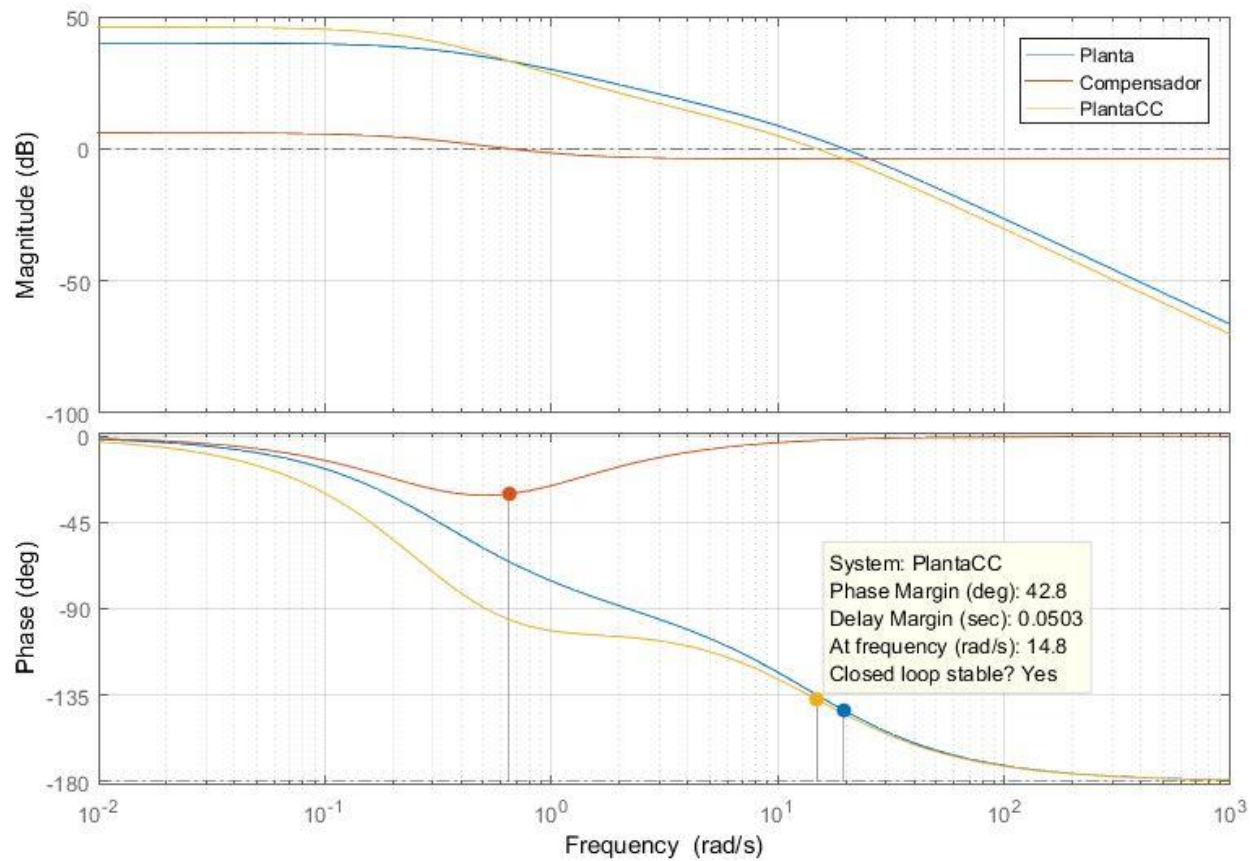


Figura 11. Trazas de Bode por compensación de atraso con base a respuesta en frecuencia – Modelo 1.

De la figura 11 se observa en color azul el sistema inicial (Planta), en rojo el compensador de atraso (Compensador) y en amarillo el sistema con el compensador en cascada (PlantaCC). Se puede apreciar un Margen de fase de 42.8° obteniendo así un valor deseado que contribuye a mejorar la etapa transitoria del sistema.

Se procede a graficar las pruebas de paso para el modelo 1 usando el compensador de atraso, de las cuales en la figura 12 se observa en color azul el sistema sin compensar (Planta) y en color rojo el mismo sistema con el compensador en cascada (PlantaCC).

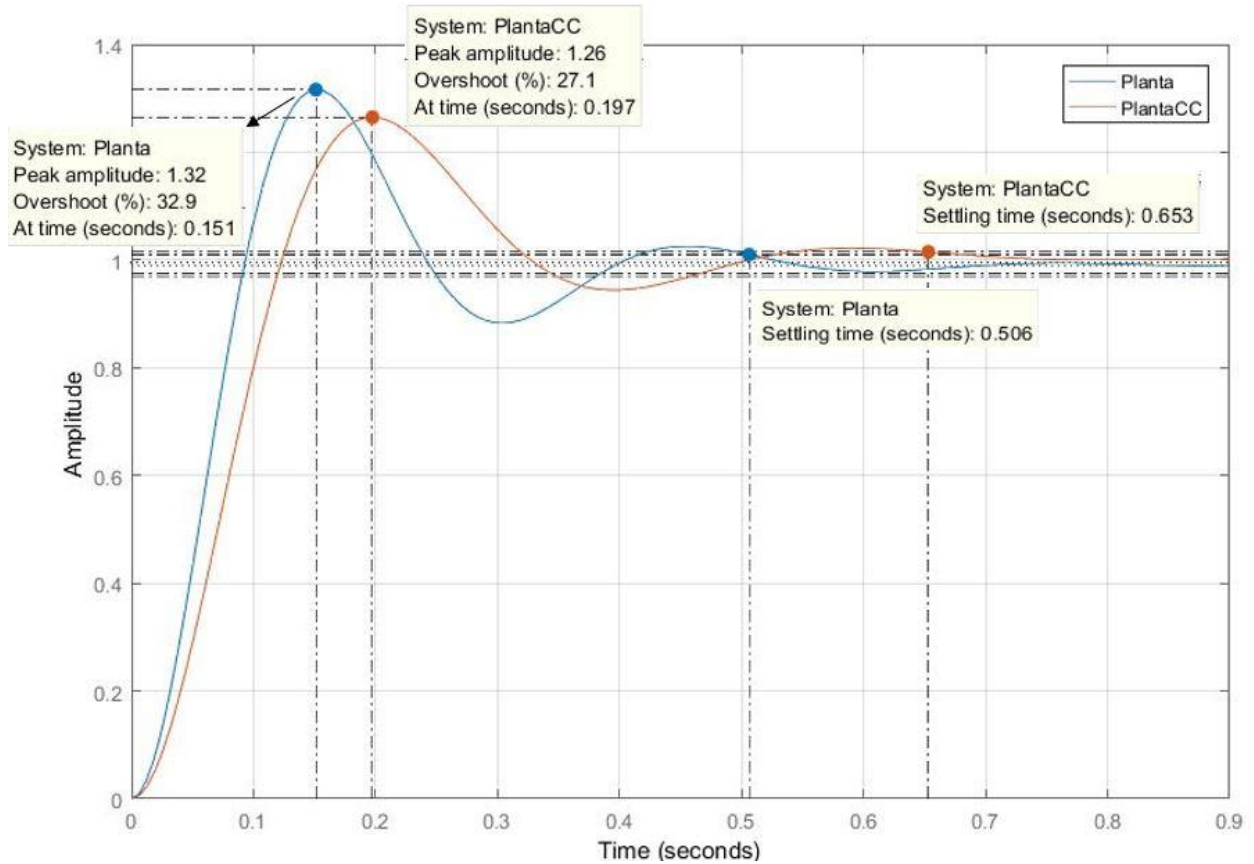


Figura 12. Respuesta escalón unitario con compensación por atraso con base a respuesta en frecuencia - Modelo 1.

De la figura 12 se puede observar que el compensador adelanta la respuesta transitoria, mejora la respuesta en estado estable y mitiga los efectos del sobrepaso, para ello se observa que el sistema sin compensar posee un tiempo de establecimiento de 0,506 segundos y un sobrepaso de 32,9% y luego de aplicar el compensador se tiene un tiempo de establecimiento de 0,653 segundos y un sobrepaso del 27.1%.

Del diseño anterior del compensador de adelanto mediante la respuesta en frecuencia podemos obtener un nuevo valor de K_p , el cual nombraremos como K_p' que será la constante de error compensada que se puede determinar de la siguiente forma:

$$K_p' = \lim_{s \rightarrow 0} G_c(s) G(s) \quad (4.14)$$

Donde $G_c(s)$ es la función de transferencia del compensado y $G(s)$ hace referencia a la función de transferencia de la planta.

$$K_p' = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\left(0.6419 \frac{s + 0.9}{s + 0.2889} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right) \right)$$

De lo anterior se encuentra que: $K_p' = 199.9688$ por lo tanto del nuevo error estacionario (ecuación 4.1) se obtiene un valor de $E_p = 0.4975\%$, cumpliendo con su característica de mejorar la respuesta en estado estable, en donde se puede observar una mejoría al aplicar el compensador, 0.99% de error en estado estable sin el compensador y 0.4975% de error en estado estable con el compensador.

Nótese que como se trabaja con un modelo de planta que tiene como característica ser de tipo 0 (no posee polos en el origen), para el compensador de atraso, no se puede observar su característica principal la cual es mejorar la respuesta en estado estable, esto debido a que las pruebas de paso se realizan con la función escalón unitario y no con una función rampa; la limitante de que el modelo 1 sea de tipo 0 no permite realizar este tipo de pruebas, además se trabaja con un modelo en donde por su naturaleza ya es estable, por lo que al este ser compensado con filtros de adelanto o atraso, siempre será capaz de seguir un escalón.

4.1.3 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO-ATRASO POR RESPUESTA EN FRECUENCIA.

Para el diseño del compensador adelanto atraso se tiene una limitante debido a que es necesario obtener de las trazas de bode, específicamente del diagrama de fase, la frecuencia donde esta cruza por -180° . De la figura 6 u 9, se puede apreciar que el diagrama de fase de la planta (curva azul en ambos casos), no cruza por dicha fase y por consiguiente no es posible para este caso llevar a cabo el procedimiento para el diseño del compensador. Dicho procedimiento se puede visualizar en [6].

4.2 DISEÑO DE COMPENSADORES MEDIANTE TÉCNICA DEL LUGAR DE LAS RAÍCES (LGR).

A partir de la metodología para el diseño del compensador mediante la técnica del lugar de las raíces descrita en [6], se siguen los pasos para encontrar los parámetros que determinan la ecuación (4.15)

$$G_c(s) = K_c \alpha \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad (4.15)$$

Para la figura 3 “Modelo 1”, se inicia el diseño graficando el LGR del sistema sin compensar (únicamente la planta) y se obtiene un punto de partida para proceder al cálculo de los parámetros del controlador (ver figura 14).

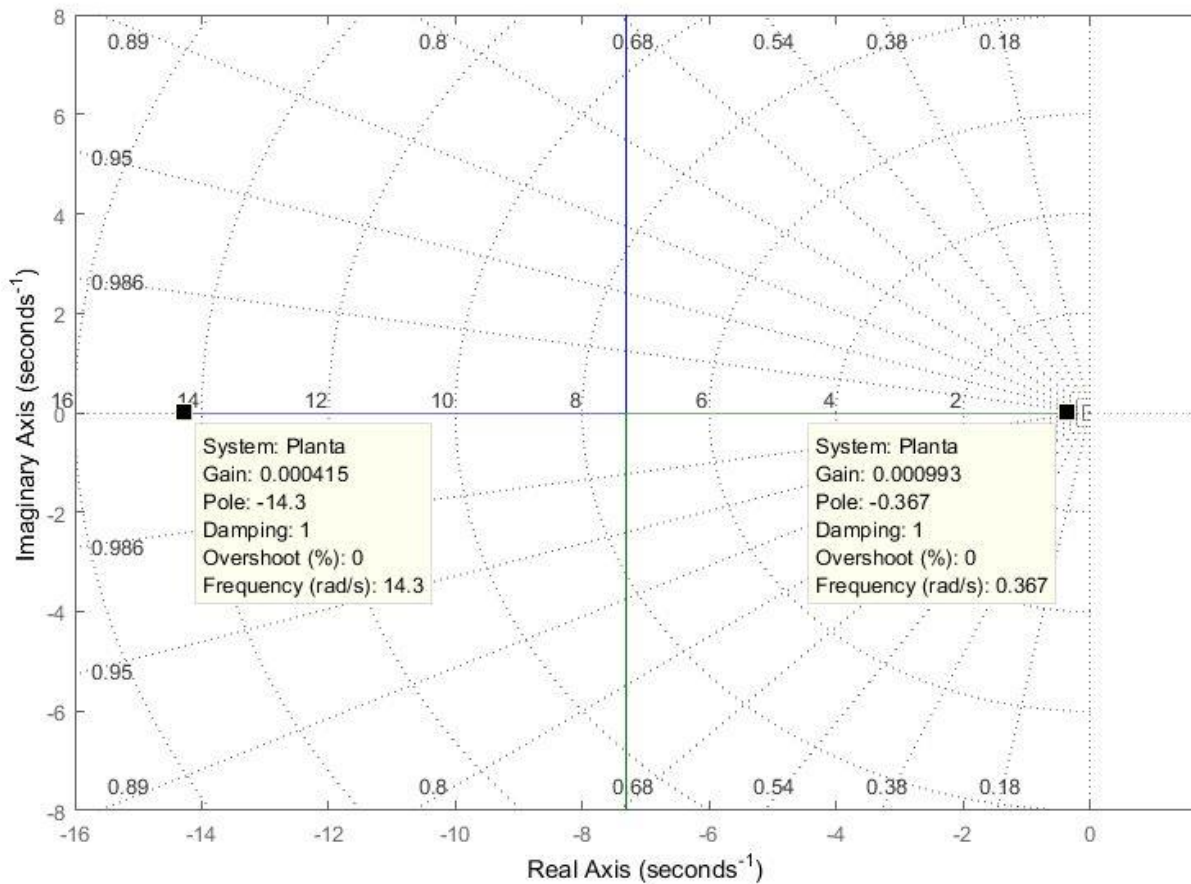


Figura 13. Localización de las raíces del sistema del modelo 1.

4.2.1 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO POR LUGAR DE LAS RAÍCES

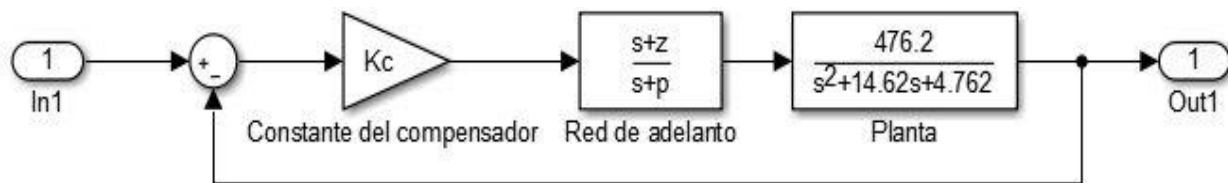


Figura 14. Diagrama de bloques para el diseño del filtro de adelanto mediante la técnica de LGR.

De la figura 13 se puede apreciar la planta la cual corresponde a la función de transferencia descrita por el modelo 1 (ver figura 3) y la etapa de control la cual corresponde al diseño del filtro de adelanto que se compone por la constante de compensador y el filtro de adelanto.

Por recomendación de [6], el polo que se encuentra ubicado más a la izquierda, en este caso $S = -14,3$ representa un límite en el cual, a partir de allí se puede ubicar la parte real de los polos deseados.

La localización de los polos dominantes en lazo cerrado se puede determinar a partir de la ecuación característica

$$p_{1,2} = -\xi w_n \pm j w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.16)$$

donde se escoge -14 como parte real negativa; por lo tanto, se tiene:

$$-14 = -\xi w_n$$

De las especificaciones de funcionamiento en el dominio del tiempo se selecciona el factor de amortiguamiento relativo $\xi=0.5$, teniendo así un sobrepaso menor al 20% como se observa:

$$\%M_p = e^{-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} * 100 \quad (4.17)$$

$$M_p = e^{-\frac{\pi * 0.5}{\sqrt{1-0.5^2}}}$$

$$\%M_p = 16.3\%$$

De modo que la frecuencia natural no amortiguada de los polos en lazo cerrado es

$$w_n = \frac{14}{0.5} = 28 \text{ rad/s}$$

Por consiguiente, se tienen los siguientes polos dominantes deseados

$$p_d = -14 \pm j14\sqrt{3}$$

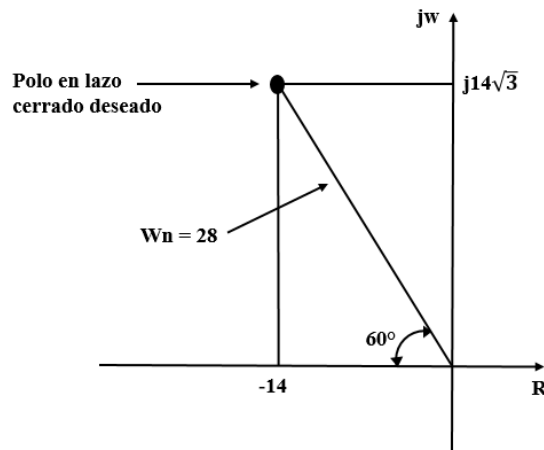


Figura 15. Localización del polo deseado en lazo cerrado.

Con los polos dominantes deseados calculados se procede a obtener el ángulo de adelanto que debe aportar la red para que el LGR pase por dichos polos. Para esto se aplica la condición de fase

$$\angle GH(j\omega)^\circ = -180^\circ \quad (4.18)$$

La cual indica que la fase del sistema general de la figura 11, en este caso, la planta y el compensador debe ser de -180° .

El ángulo de la planta viene dado por:

$$\angle G_p H(s)^\circ \big|_{s=p_d} = -\angle s \big|_{p_d} - \angle (s+1) \big|_{p_d} \quad (4.19)$$

Con

$$s = p_d = -14 \pm j14\sqrt{3}$$

$$-\angle(-14 \pm j14\sqrt{3} + 0.3333) - \angle(-14 \pm j14\sqrt{3} + 14.2866) = -208.7272^\circ$$

Para cumplir la condición de fase, el ángulo de adelanto que debe contribuir el compensador viene dado por:

$$\varphi = 208.73^\circ - 180^\circ = 28.7^\circ$$

En este punto en el que para un valor específico de polos dominantes deseados se tiene determinado ángulo de adelanto, se puede notar que existen infinitas soluciones para el cálculo del compensador. Y que dependen de la elección de la ubicación deseada de los polos, así como alguna especificación deseada en el dominio del tiempo.

A continuación, se presentan dos métodos para el cálculo de la ubicación del polo y del cero del compensador

Método 1.

El primer método consiste en dibujar una línea horizontal que empieza desde el punto P hacia el punto A formando así la línea PA de la figura 16. Se dibuja una línea que conecte el punto P con el origen y se procede a biseccionar el ángulo APO formando así la línea PB. Seguidamente se dibujan dos líneas PC y PD que formen ángulos de $\varphi/2$ con la bisectriz PB. Las intersecciones de sendas líneas con el eje real negativo proporcionan la ubicación del polo y del cero del compensador de adelanto.

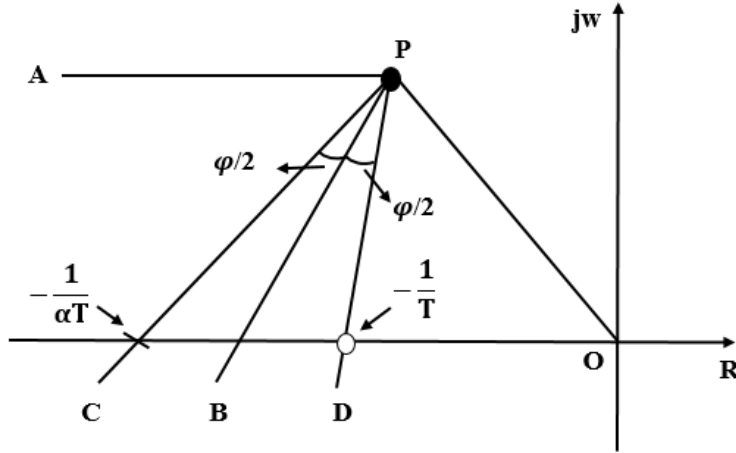


Figura 16. Método 1 para la determinación del polo y cero de una red de adelanto diseñado con base a LGR.

Siguiendo el procedimiento anterior, el compensador diseñado hará de P un punto sobre el lugar de las raíces del nuevo sistema.

El ángulo que debe contribuir la red de adelanto es $\varphi=28,7^\circ$; biseccionando el ángulo APO, y tomando $28,7/2^\circ$ a cada lado, se obtienen el valor del cero y del polo de la red de adelanto como sigue:

$$S = 20,793$$

$$P = 37,704$$

Cabe aclarar que conociendo el valor de la línea PO, y el ángulo APO, es posible determinar la ubicación del polo y del cero de la red utilizando algunas propiedades de los ángulos y la ley de senos.

Continuando con el diseño de la red, para determinar la ganancia en lazo abierto se hace uso de la condición de magnitud como se muestra:

$$\left\| K_c \left(\frac{s + 20.793}{s + 37.704} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right) \right\| = 1$$

$$S = P_d = -14 \pm j14\sqrt{3}$$

$$K_c = 1.90875$$

Por consiguiente, la red de adelanto diseñada viene dada por:

$$G_c(s) = 1.90875 \frac{s + 20.793}{s + 37.704} \quad (4.20)$$

Se calcula la constante de error de posición estática para el sistema con compensación haciendo uso de la ecuación (4.10):

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} 1.90875 \left(\frac{s + 20.793}{s + 37.704} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right)$$

$$K_p = 105.26$$

Con la constante calculada, el error en estado estacionario se puede calcular haciendo uso de la ecuación (4.1)

$$ep\% = \frac{1}{1 + 105.26} * 100\%$$

$$E_p = 0.94\%$$

La figura 17 muestra el sistema resultante del diseño de la red de adelanto por el método 1 del LGR.



Figura 17. Diagrama de bloques con compensador de adelanto por método 1 con base a LGR - Modelo 1.

Se verifica que el lugar de las raíces del sistema en lazo cerrado pase por los polos dominantes deseados como se muestra:

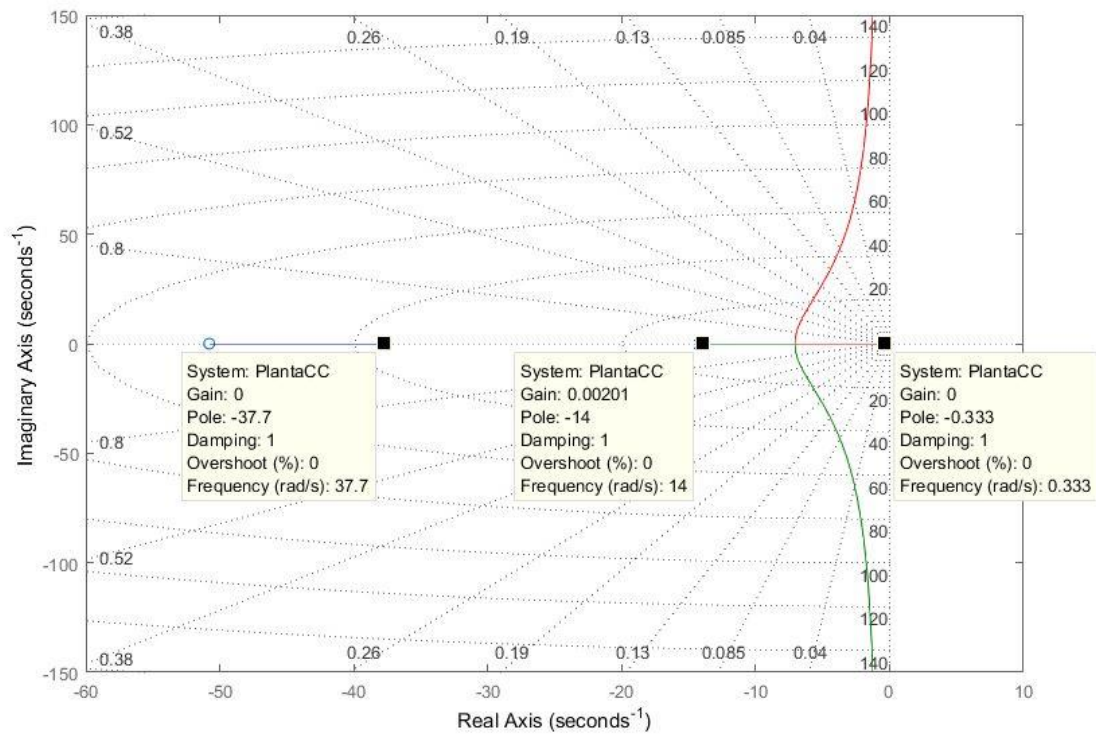


Figura 18. Localización de las raíces por compensación de adelanto por el método 1 con base a LGR – Modelo 1.

De la figura 18, se puede apreciar que el sistema de compensación diseñado no modifica satisfactoriamente el lugar de las raíces, lo que ocasiona que el LGR no cruce por los polos deseado $p_d = -14 \pm j14\sqrt{3}$.

Con la red de adelanto diseñada se muestra la respuesta a un escalón del sistema de la figura 19, esto es, incluyendo el compensador y se compara con el sistema sin compensación para verificar la efectividad del diseño.

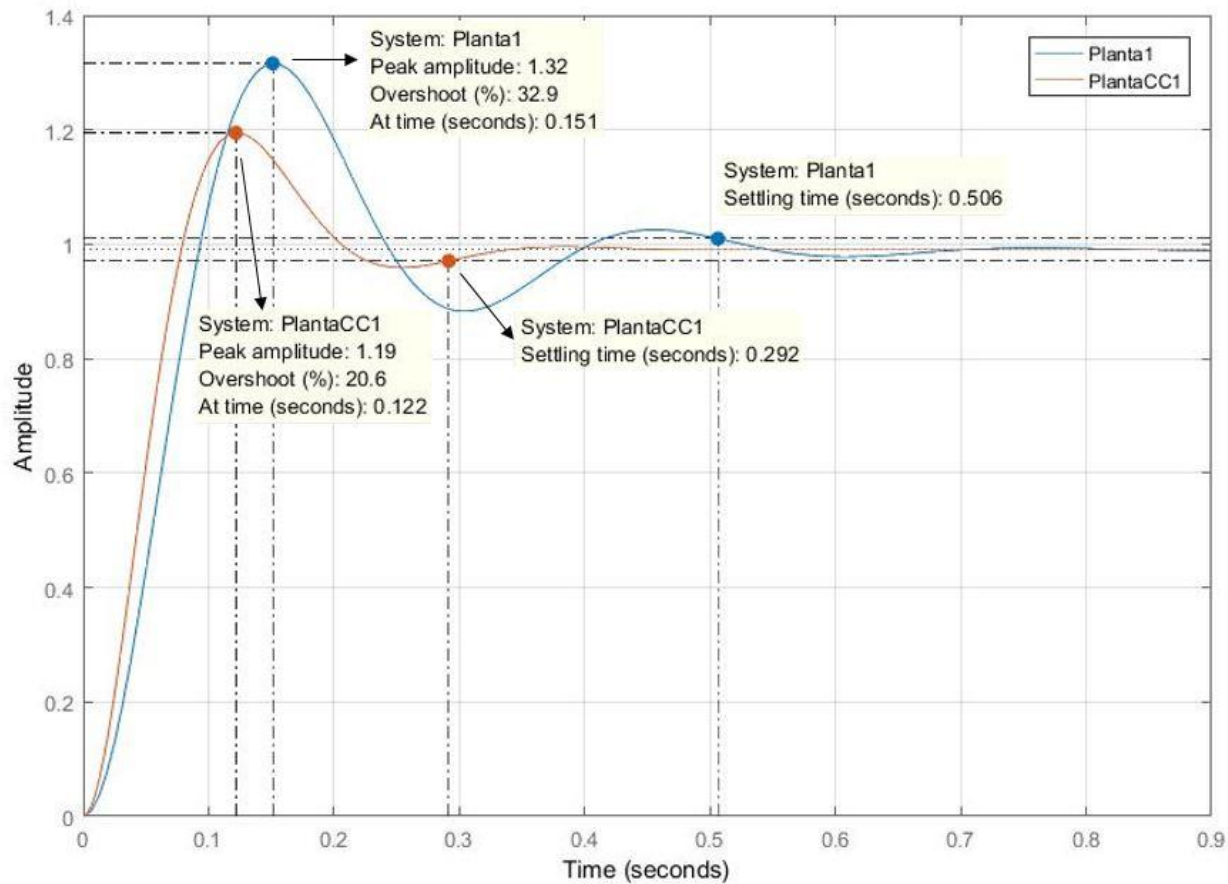


Figura 19. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto por método 1 con base LGR - Modelo 1.

De las curvas mostradas en la figura 19 se puede apreciar en color azul la respuesta al escalón unitario para la planta sin compensar (Planta1) y en color rojo la respuesta al escalón unitario para la planta con el compensador diseñado mediante el método 1 en base a LGR (PlantaCC1). Nótese que, aunque la localización de las raíces no cruce por el polo deseado se puede apreciar una mejora en la respuesta transitoria, disminuyendo la sobre elongación de un 32.9% a un 20.6% y el tiempo de establecimiento de 0.506s a 0.292s verificando la efectividad del compensador.

Método 2.

El segundo método para el cálculo del cero y polo del compensador consiste en fijar el cero y con este determinar el valor del polo, utilizando la ecuación de fase del compensador en donde esta debe ser igual al ángulo de adelanto que se debe contribuir como se muestra:

$$\angle(s + Z) - P\angle(s + P) = \varphi \quad (4.21)$$

Con $s = P_d$

Escogiendo $Z = 16$, y con $s = P_d = -14 \pm j14\sqrt{3}$; se tiene que:

$$\angle(-14 \pm 14\sqrt{3}j + 16) - \angle(-14 \pm j14\sqrt{3} + P) = 28.7^\circ$$

$$80.63^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{14\sqrt{3}}{-14 + P}\right) = 28.7^\circ$$

$$P = 30.0015$$

Con el valor del polo calculado se procede a determinar la ganancia en lazo abierto utilizando la condición de magnitud:

$$\left\| K_c \left(\frac{s + 16}{s + 30.0015} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right) \right\| = 1$$

Con $s = P_d = -14 \pm j14\sqrt{3}$

$$K_c = 1.6925$$

Por consiguiente, la red de adelanto diseñada viene dada por:

$$G_c(s) = 1.6925 \frac{s + 16}{s + 30.0015}$$

Se calcula la constante de error de posición estática para el sistema con compensación haciendo uso de la ecuación (4.10):

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} 1.6925 \left(\frac{s + 16}{s + 30.0015} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right)$$

$$K_p = 90.26$$

Con la constante calculada, el error en estado estacionario viene dado por (ecuación 4.1):

$$ep\% = \frac{1}{1 + 90.26} * 100\%$$

$$E_p = 1.095\%$$

La figura 20 muestra el sistema resultante del diseño de la red de adelanto por el método 2 del LGR.



Figura 20. Diagrama de bloques con compensador de adelanto por método 2 con base a LGR - Modelo 1.

Se verifica que el lugar de las raíces del sistema en lazo cerrado pase por los polos dominantes deseados como se muestra:

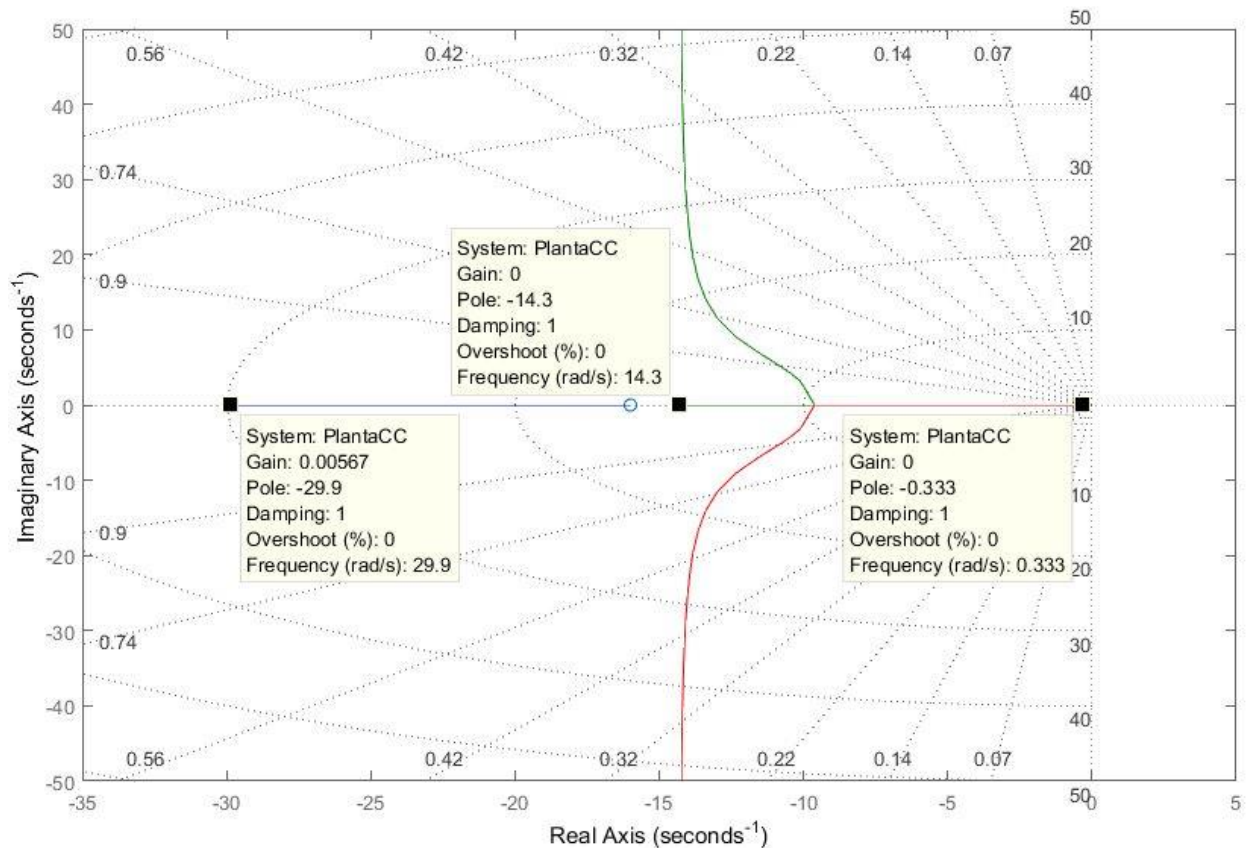


Figura 21. Localización de las raíces por compensación de adelanto por el método 2 con base a LGR – Modelo 1

De la figura 21, se puede apreciar que el sistema de compensación diseñado modifica satisfactoriamente el lugar de las raíces, lo que da como resultado que este pase por el polo deseado $p_d = -14 \pm j14\sqrt{3}$.

Con la red de adelanto diseñada se muestra la respuesta a un escalón del sistema de la figura 20, y se compara con el sistema sin compensación para verificar la efectividad del diseño. Adicionalmente se compara con el resultado obtenido por el método 1.

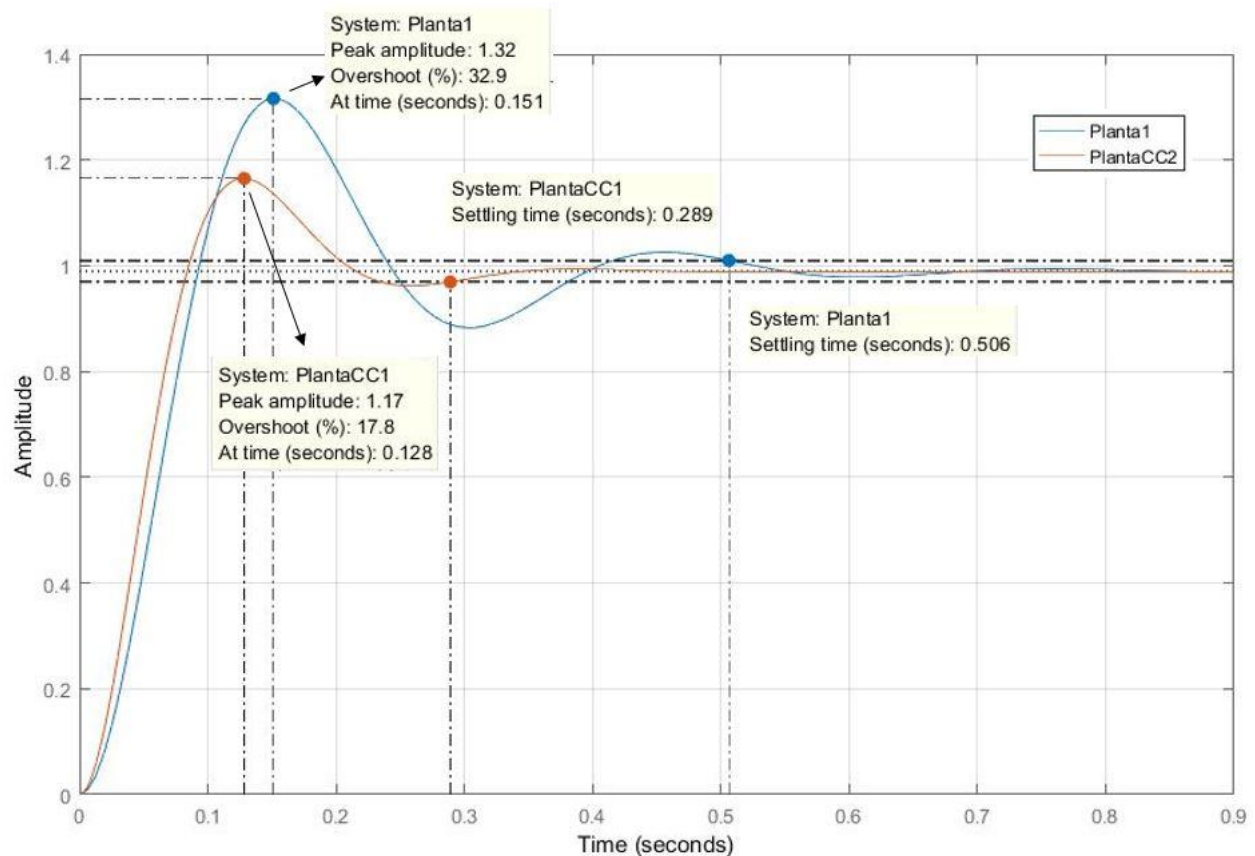


Figura 22. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto por método 2 con base LGR - Modelo 1.

De las curvas mostrada en la figura 22 se puede apreciar en color azul la respuesta al escalón unitario para la planta sin compensar (Planta1) y en color rojo la respuesta al escalón unitario para la planta con el compensador diseñado mediante el método 2 en base a LGR (PlantaCC2).

De las curvas mostradas se puede apreciar que hay una mejora en la respuesta transitoria, disminuyendo la sobre elongación de un 32.9% a un 17.8% y el tiempo de establecimiento de 0.506s a 0.289s verificando así la veracidad del diseño y la efectividad del compensador. Se observa que el método 2 disminuye aún más el sobre paso que el método 1 pero alentando un poco la respuesta; se comprueba así que ambos métodos son efectivos para el cálculo de los valores de la red.

El diseño por el método 1 proporciona un mayor valor de las constantes de error, por lo tanto, tendrá un error en estado estacionario menor. Así pues, para decidir qué método es mejor e implementar para el diseño del compensador, se debe observar que característica se desea en la respuesta, si un sobre paso mucho menor o un error en estado estacionario más pequeño.

Nótese que para el mismo ángulo de fase que se debe contribuir, este puede lograrse con una combinación infinita de polos y ceros diferentes, por lo cual el diseñador del controlador tiene infinitas opciones para sintonizar el controlador y que este cumpla con las especificaciones que se demanden; sin embargo, tener tan amplio rango de opciones resulta ser un problema para iniciar el diseño, por ello, la metodología descrita anteriormente busca limitar las opciones enfocándose en obtener la mejor respuesta y esto es, obtener altos valores de α y K_p que a su vez mejoran la repuesta transitoria y disminuyen el error estacionario (método 1).

4.2.2 DISEÑO COMPENSADOR DE ATRASO POR LUGAR DE LAS RAÍCES.

Para el diseño del compensador se tiene el modelo:

$$G_c(s) = \hat{K}_c \beta \frac{Ts + 1}{\beta Ts + 1} = \hat{K}_c \frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\beta T}} \quad (4.22)$$

El principal objetivo del compensador de atraso, es mejorar la respuesta de estado estacionario del sistema, aumentando el valor de la constante de error K_p sin modificar el lugar de las raíces obtenido en la figura 12. El procedimiento inicia calculando el error de estado estacionario del sistema original, en este caso el valor calculado en el literal 5.1

$$K_p = 100$$

$$E_p = 0.99\%$$

Para mejorar el error de estado estacionario, se quiere aumentar la constante de error de posición estática a un valor de 200. Al incluir el compensador en serie al sistema, se tiene que:

$$200 = \lim_{s \rightarrow 0} \left(K_c \frac{Ts + 1}{\beta Ts + 1} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right)$$

Con $K_c \beta = 2$

Para no modificar el lugar de las raíces del sistema se fija $K_c = 1$ por consiguiente $\beta = 2$

Escogiendo el cero del compensador lo más cercano al origen:

$$Z = \frac{1}{T} = 0.05$$

De esta manera el polo resultante sería:

$$P = \frac{1}{\beta T} = \frac{0.05}{2} = 0.025$$

La red de atraso diseñada es:

$$G_c(s) = K_c \frac{s + 0.05}{s + 0.025}$$

Para la constante K_c se procede a reajustar su valor utilizando la condición de magnitud. El valor de los polos deseados, al no modificarse el LGR actual del sistema, siguen siendo los mismos actuales de la planta, para el caso dado $P = 14,3$

$$\| K_c \left(\frac{s + 0.05}{s + 0.025} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right) \| = 1$$

Con $s = P_d = 14,3$

$$K_c = 0.87$$

Finalmente, el compensador obtenido es:

$$G_c(s) = 0.876 \frac{s + 0.05}{s + 0.025} \quad (4.23)$$

Se calcula de nuevo el error de estado estacionario haciendo uso de las ecuaciones (4.10) y (4.1)

$$E_p = 0,567\%$$

Se observa una mejora en el error de estado estacionario.

La figura 23 muestra el sistema resultante del diseño de la red de atraso en base a la metodología del LGR.

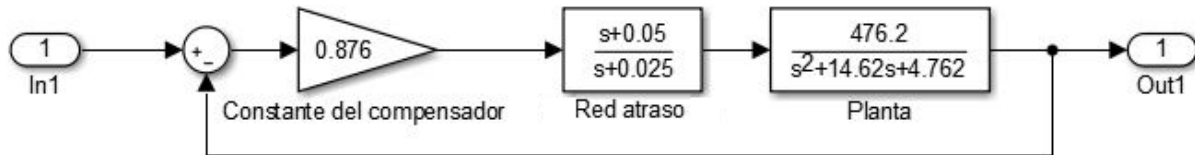


Figura 23. Diagrama de bloques con compensador de atraso con base a LGR - Modelo 1.

Seguidamente se verifica que el aporte de fase del compensador al sistema es mínimo mediante el LGR resultante como se observa:

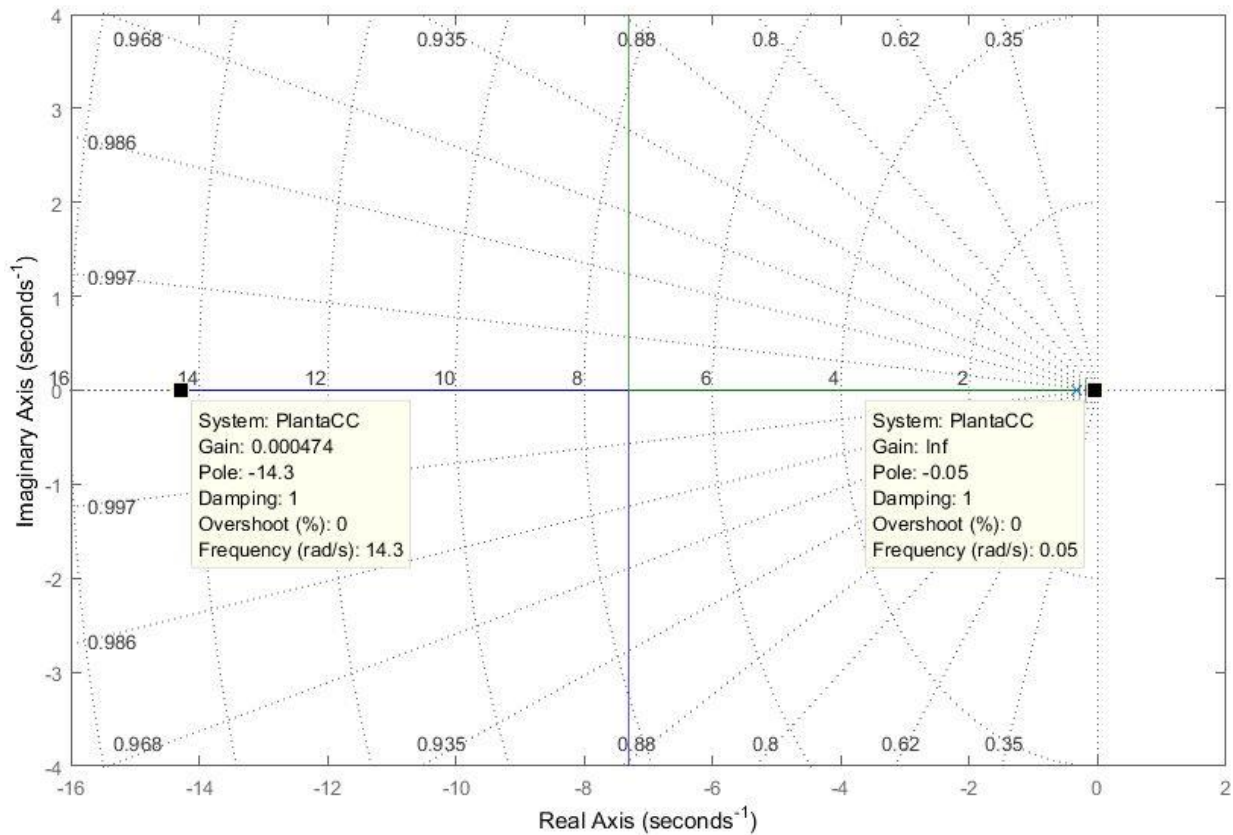


Figura 24. Localización de las raíces por compensación de atraso con base a LGR – Modelo 1.

Del lugar de las raíces del sistema compensado (figura 24) se puede apreciar que no sufre modificaciones en comparación con el LGR del sistema original (figura 14), evidenciando que el aporte de fase del compensador es muy bajo con el objetivo de no afectar la respuesta transitoria del sistema por consiguiente el diseño es satisfactorio. A continuación, se obtiene la respuesta escalón del sistema compensado y sin compensar:

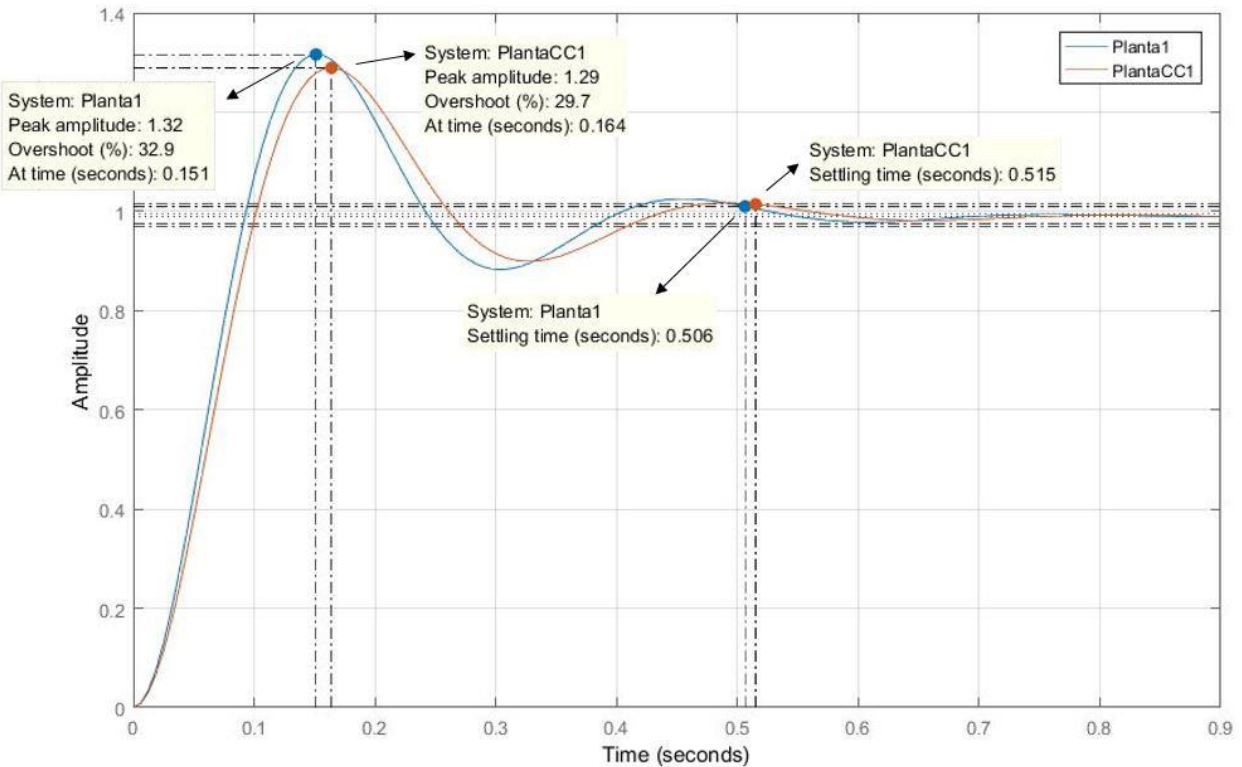


Figura 25. Respuesta escalón unitario con compensación por atraso con base LGR - Modelo 1

De las curvas mostrada en la figura 25 se puede apreciar en color azul la respuesta al escalón unitario para la planta sin compensar (Planta1) y en color rojo la respuesta al escalón unitario para la planta con el compensador de atraso en base al LGR (PlantaCC1);

Se comprueba que el compensador diseñado altera levemente la respuesta transitoria del sistema, sin embargo, mejora un poco la misma. Se observa una mejora en el error de estado estacionario, pasando de 0.506s a 0.515s y una amortiguación al sobrepaso disminuyendo de 32.9% a 29.7%, comprobando así la efectividad del compensador. Es importante denotar que el sistema original ya presenta una característica muy estable y esta reducción en el error es baja por lo tanto no es muy apreciable; no obstante, sirve para demostrar una buena práctica de mejoramiento para sistemas cuya respuesta de estado estacionario no sea del todo aceptable.

Debido a la limitante que se tiene con la planta actual, de ser tipo 0, es decir, no tener polos en el origen, no es posible realizar los cálculos anteriores con la constante de error de velocidad, donde es posible de manera más clara el comportamiento del sistema en estado estacionario ante una entrada Rampa.

4.2.3 DISEÑO COMPENSADOR DE ADELANTO-ATRASO POR LUGAR DE LAS RAÍCES.

El compensador Adelanto-Atraso combina las ventajas de ambas compensaciones, en el caso de la compensación por adelanto, acelera la respuesta, es decir, mejora la etapa transitoria. Por otro lado, la compensación de retardo mejora la precisión en estado estable, sin embargo, afecta la velocidad de respuesta.

El procedimiento de diseño de esta red, implica iniciar con la compensación de adelanto y en segundo lugar la red de retardo. Para el caso dado se tomará el compensador de adelanto diseñado en el capítulo 4.2.1 por el método 2, por lo que se tiene:

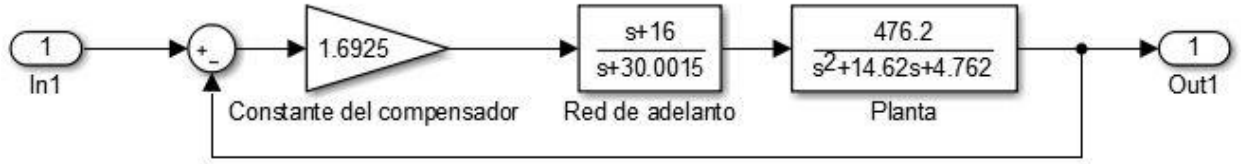


Figura 26. Diagrama de bloques compensador de adelanto por método 2 con base a LGR y planta original.

Para el sistema de la figura 17, de los cálculos realizados en el literal 4.2.1 se obtuvo que el valor de la constante de error estático de posición es $K_p = 90.26$

Para el diseño de la red, se pretende aumentar esta constante a un valor de 200 con el objetivo de mejorar la respuesta en estado estable. Al incluir en serie el compensador de retardo cuyo modelo se muestra en la figura 20 del literal 4.2.1, se procede al cálculo de la constante β como se muestra:

$$200 = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\left(K_c B \frac{Ts + 1}{BTs + 1} \right) \left(1.6925 \frac{s + 16}{s + 30.0015} \right) \left(\frac{476.2}{s^2 + 14.62s + 4.762} \right) \right]$$

Donde

$$K_c \beta = \frac{200}{90.26} = 2.215$$

Con el objetivo de no modificar el lugar de las raíces del sistema se fija $K_c = 1$ por consiguiente $\beta = 2.215$

Escogiendo el cero del compensador lo más cercano al origen:

$$Z = \frac{1}{T} = 0.05$$

De esta manera el polo resultante sería:

$$P = \frac{1}{\beta T} = \frac{0.05}{2.215} = 0.0225$$

Por consiguiente, la red de atraso diseñada es:

$$G_{c2}(s) = \frac{s + 0.05}{s + 0.0225}$$

El sistema resultante sería:

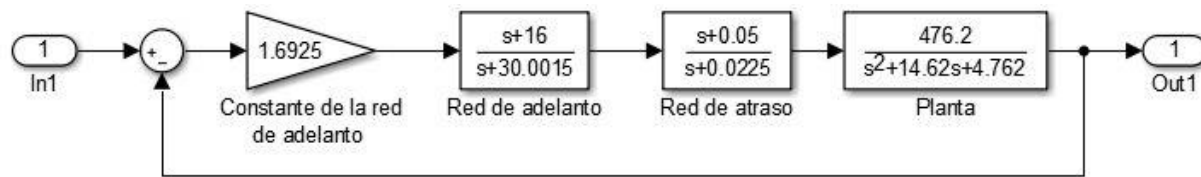


Figura 27. Diagrama de bloques con compensador de adelanto-atraso con base a LGR - Modelo 1.

Para el sistema resultante se calcula el valor de la constante de error estático de posición y el error de estado estacionario por medio de la ecuación (4.10) y (4.1) respectivamente.

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\left(\frac{s+0.05}{s+0.0225} \right) 1.6925 \left(\frac{s+16}{s+30.0015} \right) \left(\frac{476.2}{s^2+14.62s+4.762} \right) \right]$$

$$K_p = 200$$

Por ende

$$E_p = 0.49\%$$

Se verifica un mejoramiento en el error de estado estable en comparación con el sistema donde solo se tiene compensación por red de adelanto. Se muestra a continuación el lugar geométrico de las raíces y la respuesta escalón unitario del sistema compensado.

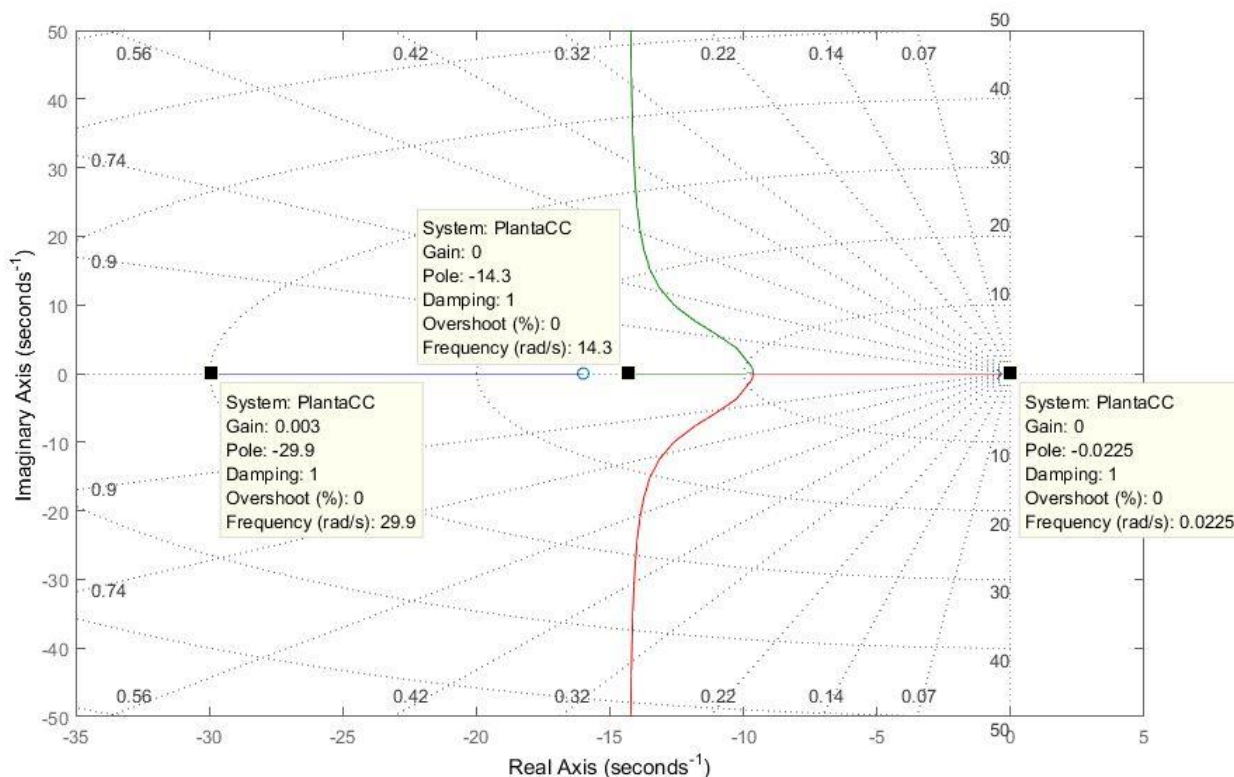


Figura 28. Localización de las raíces por compensación de adelanto-atraso con base a LGR – Modelo 1.

Del diagrama se observa que el aporte de la red de retardo en la modificación del LGR es casi nula al compararlo con el LGR del literal 4.2.1 método 2, donde solo se tiene compensación de adelanto cumpliendo con el objetivo propuesto de no modificar el LGR y cruzar por el polo deseado.

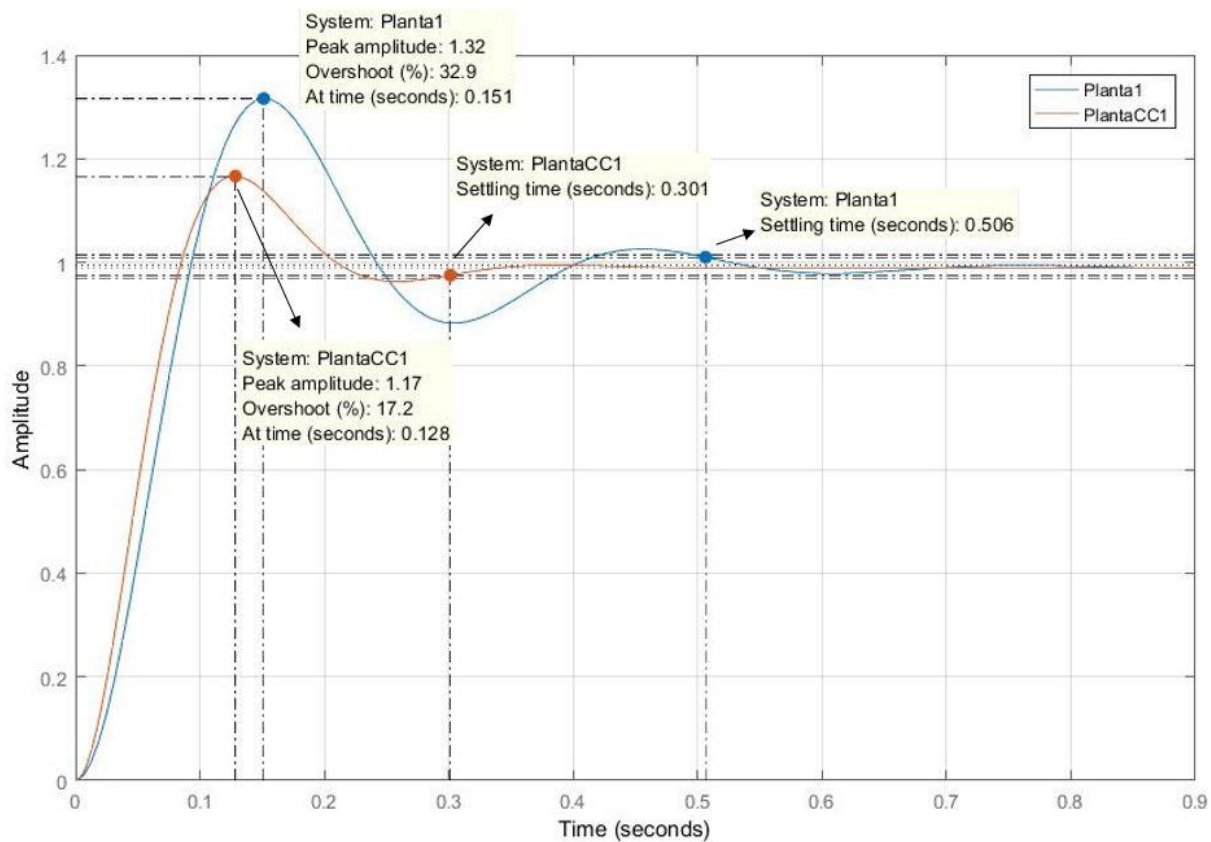


Figura 29. Respuesta escalón unitario con compensación por adelanto-atraso con base LGR - Modelo 1.

De las curvas mostrada en la figura 29 se puede apreciar en color azul la respuesta al escalón unitario para la planta sin compensar (Planta1) y en color rojo la respuesta al escalón unitario para la planta con el compensador de adelanto atraso en base al LGR (PlantaCC1);

Se observa el mejoramiento de la etapa transitoria gracias a la red de adelanto y en comparación con la figura 22 del compensador de adelanto del literal 4.2.1, la afectación que causa la

red de retardo en la respuesta es muy poca obteniendo valores de sobrepaso y tiempos de asentamiento de 17.2% y 0.301s respectivamente. Adicionalmente se observó como el error de estado estable se mejoró gracias a la red de retardo verificando así la efectividad de la compensación.

CAPITULO 5. REDES DE COMPENSACIÓN EN MODELO DE TERCER ORDEN.

Anteriormente se estudiaron dos metodologías para el diseño de redes de compensación que mejoran las características de la respuesta de un sistema, tanto la etapa transitoria como en régimen de estado estable. El diseño de estos se realizó para un sistema simple denominado “Modelo 1”. Para el presente capítulo se implementarán sendas metodologías en un sistema que hace referencia a un modelo dinámico de tercer orden de la máquina síncrona el cual será denominado “Modelo 2”

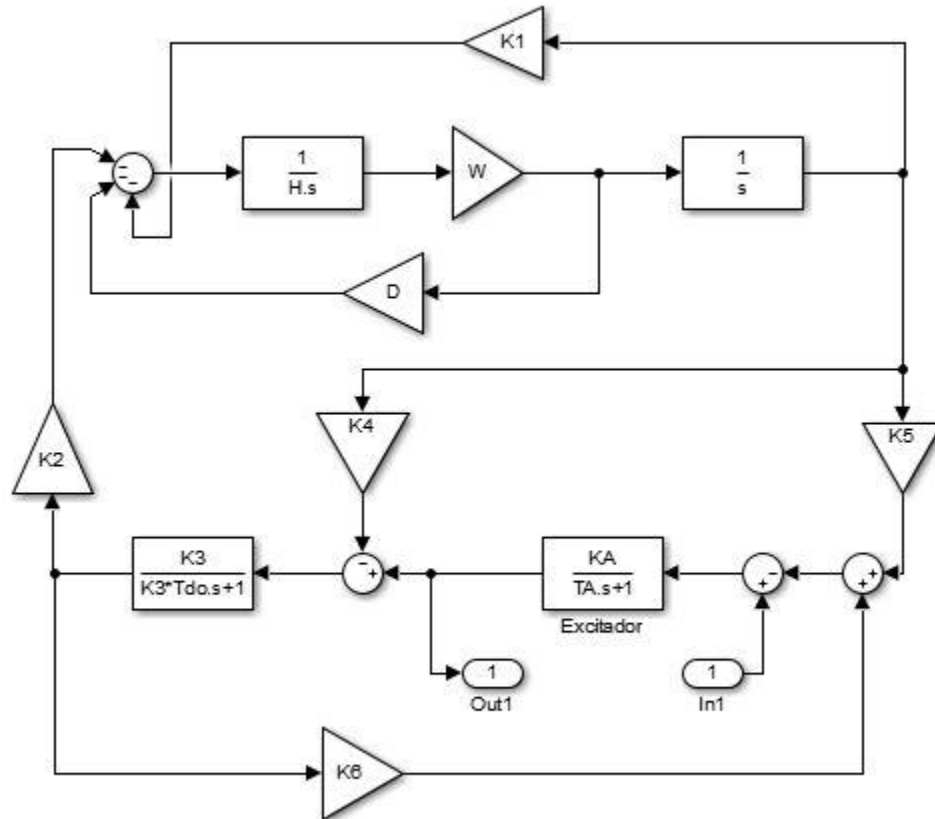


Figura 30. Diagrama de bloques del modelo dinámico de la maquina síncrona “Modelo 2”.

Este modelo se toma como ejemplo de [15] donde se especifica con más detalle los lazos que lo conforman, las constantes K1-K6, las no linealidades que son ignoradas, demás parámetros y el procedimiento realizado para obtener el modelo linealizado partiendo del conjunto de ecuaciones del modelo de segundo orden de la máquina síncrona.

El bloque observado entre el voltaje de referencia y el voltaje del devanado de campo es el excitador de la máquina. El control de tensión se realiza directamente en este lazo donde será agregada la red de compensación. El modelo se puede reducir a un simple diagrama de bloques como se muestra en la figura 31, esto para simplificar el cálculo matemático y computacional:

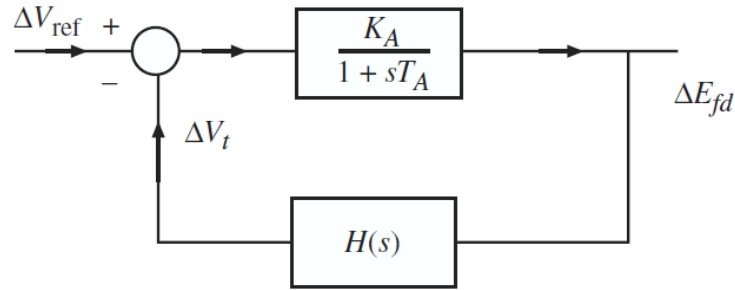


Figura 31. Diagrama de bloques del sistema reducido del modelo 2.

Donde se tiene $H(s) =$

$$H(s) = \frac{0.0723s^2 + 7.2811}{s^3 + 0.9251s^2 + 118.0795s + 47.74} \quad (5)$$

Se añade una perturbación en el voltaje de referencia (*int* figura 30) de la máquina y se observa la salida (*out* figura 30); se obtiene la respuesta en el tiempo del comportamiento de la salida de la tensión del excitador como se muestra en la figura 32:

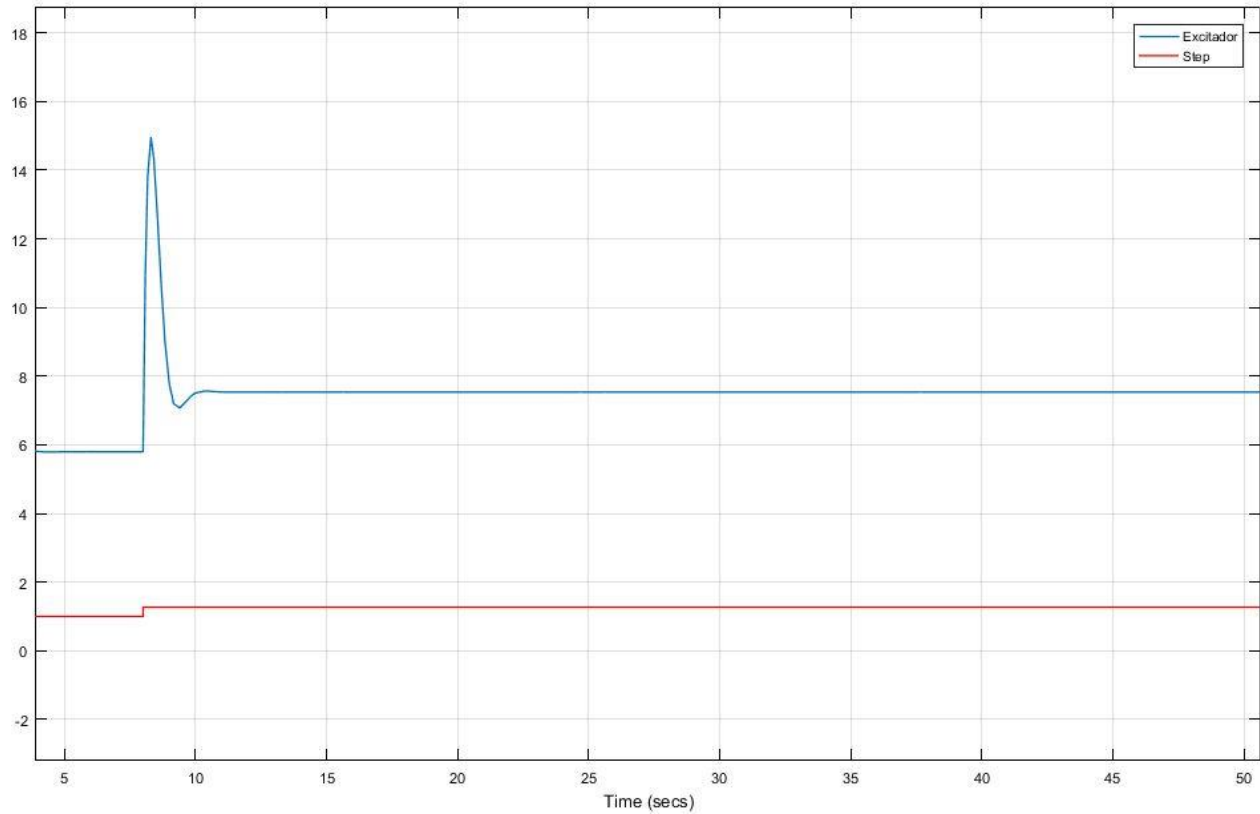


Figura 32. Curva de respuesta ante la perturbación al escalón unitario del sistema del modelo 2.

En la figura 32 se puede apreciar en color azul la curva de la respuesta de la salida de tensión del excitador del modelo 2 (figura 30) ante la referencia (escalón unitario) en color rojo. Se observa el transitorio generado

por la perturbación añadida al sistema a los 7 segundos, elevando el nivel de tensión de salida en un valor de 1 a 1.3 y la reacción del lazo de regulación que alcanza un pico máximo de 14.81 que corresponde a un sobrepaso del 54.1%, llevando la tensión a su nuevo valor de operación de 7.554.

Con el objetivo de mejorar esta respuesta, se procede a diseñar una red de compensación que contribuya a la mejora de la etapa transitoria. Como se ha demostrado en capítulos anteriores, la red que presenta el mejor comportamiento para dicha etapa, es la red de adelanto.

5.1 DISEÑO DEL COMPENSADOR DE ADELANTO MEDIANTE LA TRAZAS DE BODE PARA EL MODELO 2.

Siguiendo la metodología descrita en el literal 4.1.1 para el diseño de la red, se obtienen las trazas de Bode para el sistema de la figura 31.

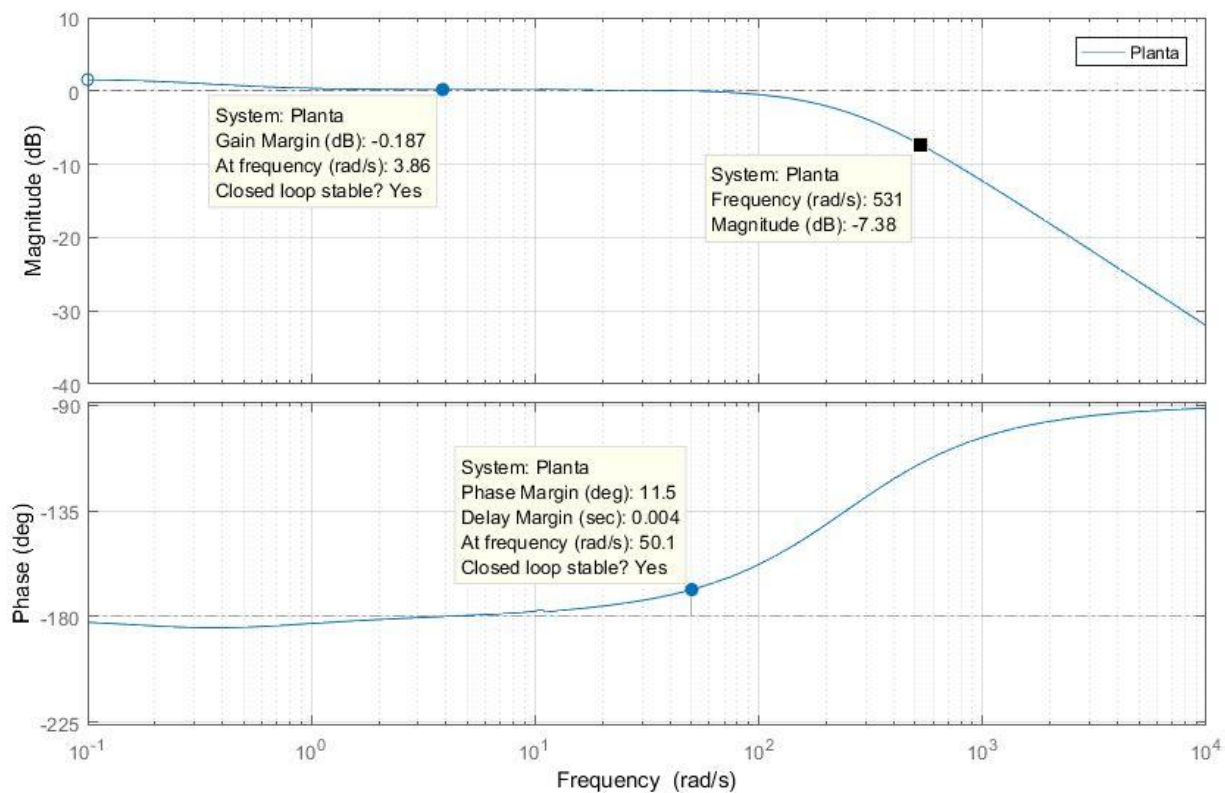


Figura 33. Trazas de Bode para el sistema reducido del modelo 2.

En la figura 33 del diagrama de fase se determina que el $MF = 11.5^\circ$; por lo tanto, la red de adelanto debe contribuir con un adelanto de fase de 38.5° más 5° como margen de seguridad requerido, dando un total de una adición de fase de 43.5° .

Calculando α a partir de la ecuación (4.3):

$$\alpha = \left(\frac{1 - \sin(43.5^\circ)}{1 + \sin(43.5^\circ)} \right)$$

$$\alpha = 0.184585$$

Obtenido α , haciendo uso de la ecuación (4.4) se procede a obtener la ganancia en decibels:

$$M = -20 \log_{10} \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right)$$

$$M = -7.338 \text{ dB}$$

Del diagrama de magnitud de bode se observa que esta ganancia ocurre a una frecuencia de $W = 531 \text{ rad/s}$ (ver figura 33).

Por último, se calcula el polo y el cero del compensador como se muestra (ecuación 4.5 y 4.6):

$$T_1 = w\sqrt{\alpha}$$

$$T_1 = 228,135$$

$$\frac{1}{\alpha T_2} = 1235.93$$

Finalmente, el compensador diseñado es:

$$G_c(s) = \frac{s + 228.135}{s + 1235.93} \quad (5.1)$$

Para este modelo en particular se encontró que un cambio mínimo en la constante del lazo regulador de tensión modifica en gran medida la respuesta del sistema. Apreciación atribuible a la gran dimensión del modelo siendo este un sistema muy sensible. Por esta razón se procede a dejar el compensador diseñado con constante proporcional unitaria.

La figura 34 muestra el sistema resultante de la adición del compensador diseñado en cascada al excitador en el diagrama de bloques del modelo 2.

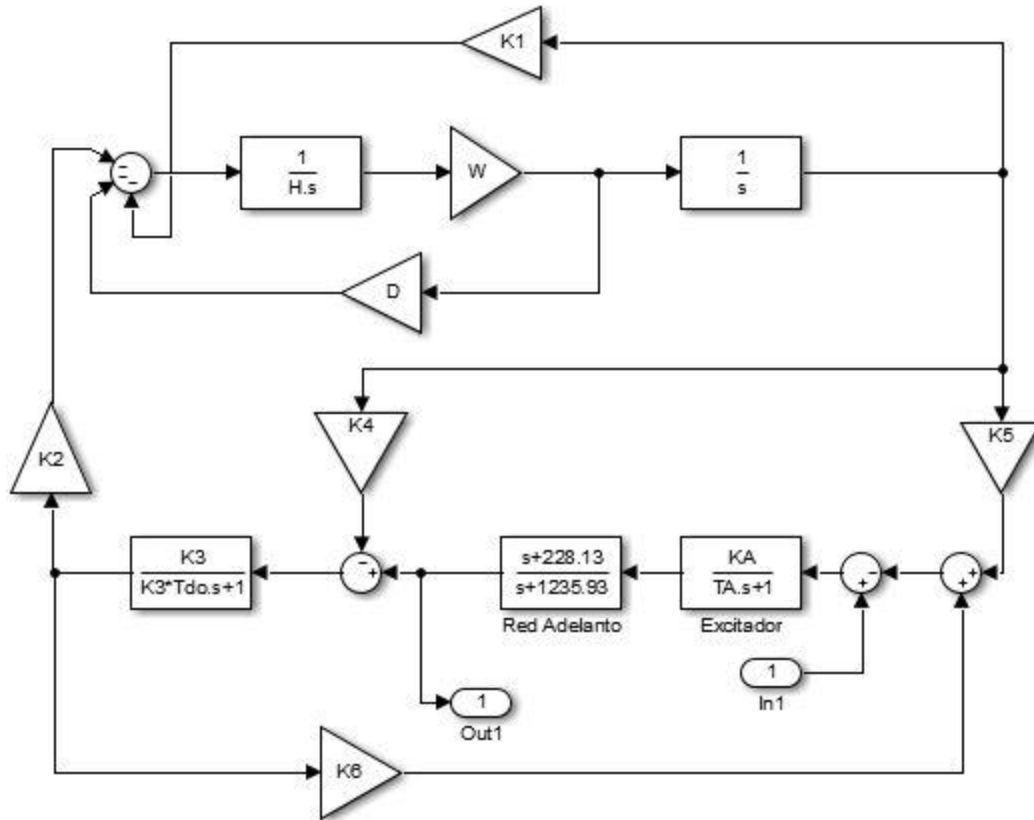


Figura 34. Diagrama de bloques con compensador de adelanto con base a respuesta en frecuencia - Modelo 2.

Se obtienen las trazas de bode del sistema con la red de compensación añadida en el lazo de regulación de tensión

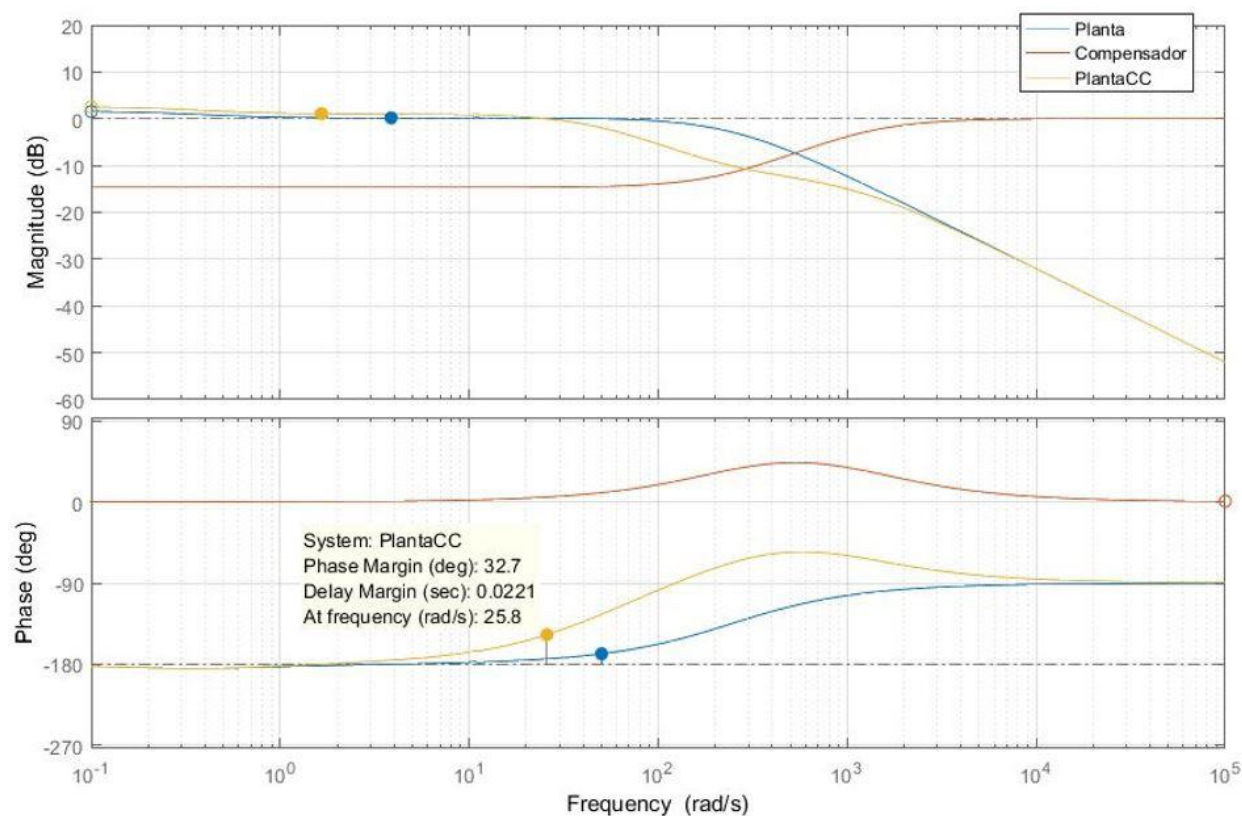


Figura 35. Trazas de Bode por compensación de adelanto con base a respuesta en frecuencia – Modelo 2.

De la figura 35 se puede apreciar en color azul las trazas de bode de la Planta sin compensar, en color rojo el compensador de adelanto diseñado y en color rojo las trazas de Bode de la planta ya compensada. A partir de este diagrama se observa que el MF aumenta de $11,5^\circ$ a $32,7^\circ$ el cual es inferior al valor deseado que oscila entre los $50-60^\circ$. Aunque no se llega al rango del valor deseado, se puede apreciar una mejora en el margen de fase contribuyendo a la estabilidad, puesto que entre más pequeño sea este margen, más tenderá el sistema hacia la inestabilidad; por consiguiente, un valor de $32,7^\circ$ es admisible para los propósitos de diseño de este documento.

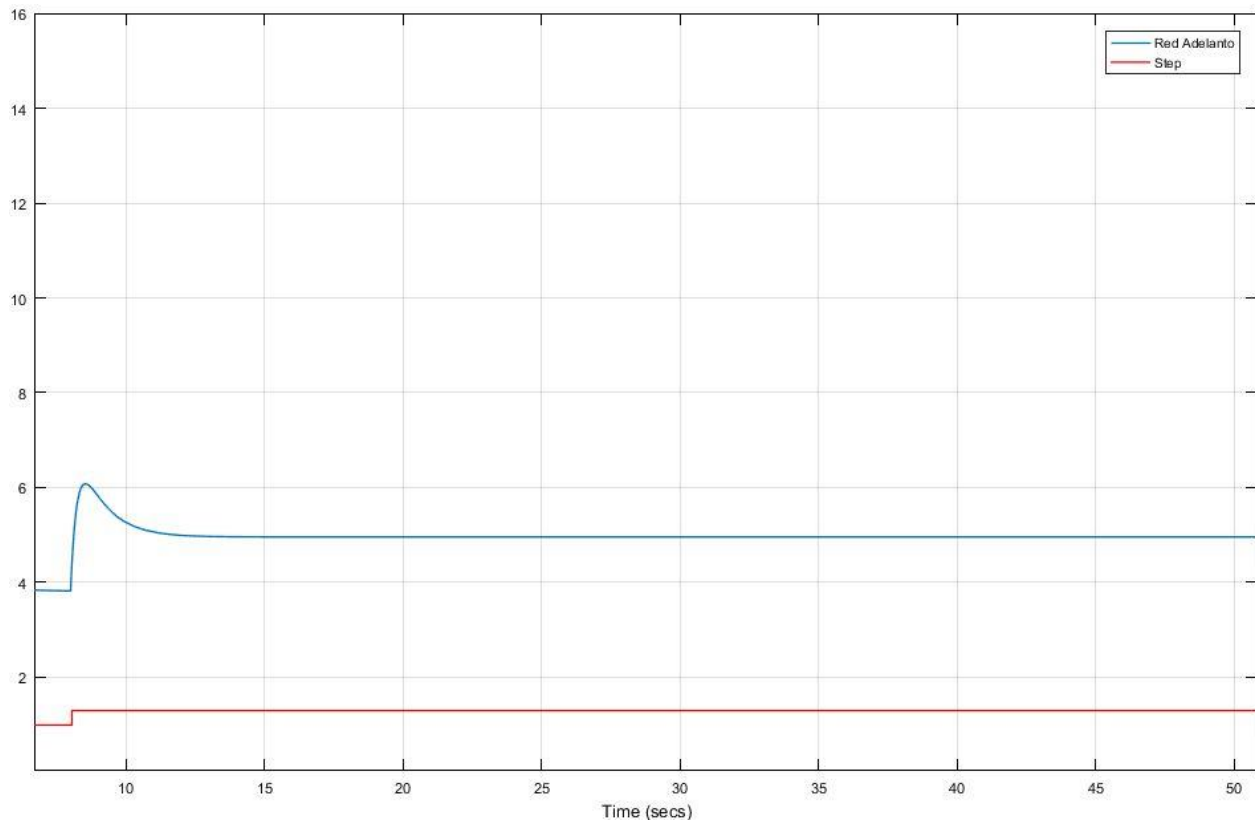


Figura 36. Curva de respuesta ante la perturbación para el modelo 2 compensado por adelanto con base a respuesta en frecuencia.

La figura 36 muestra la curva de la respuesta al escalón, en color azul la respuesta de la salida de tensión del excitador del sistema compensado mediante la red de adelanto y la curva en color rojo corresponde a la referencia (escalón unitario).

Se observa que al añadir el compensador en el sistema, tanto la inicialización del escalón como la perturbación provocada a los 7 segundos presentan un sobrepaso menor que el observado en la figura 32 “sistema sin compensación”, mejorando la respuesta transitoria del sistema lográndose disminuir el pico máximo del sobrepaso de 14.81 (sistema sin compensar) a 6.085 (sistema compensado) lo que corresponde a un sobrepaso del 22.23% llegándose a un valor de operación final de 4.96, además de obtenerse una respuesta más suavizada y sin oscilaciones.

5.2 DISEÑO DEL COMPENSADOR DE ADELANTO MEDIANTE LUGAR GEOMÉTRICO DE LAS RAÍCES PARA EL MODELO 2.

Siguiendo la metodología descrita en el literal 4.2.1 para el diseño de la red de adelanto, se obtienen el lugar de las raíces para el sistema de 31.

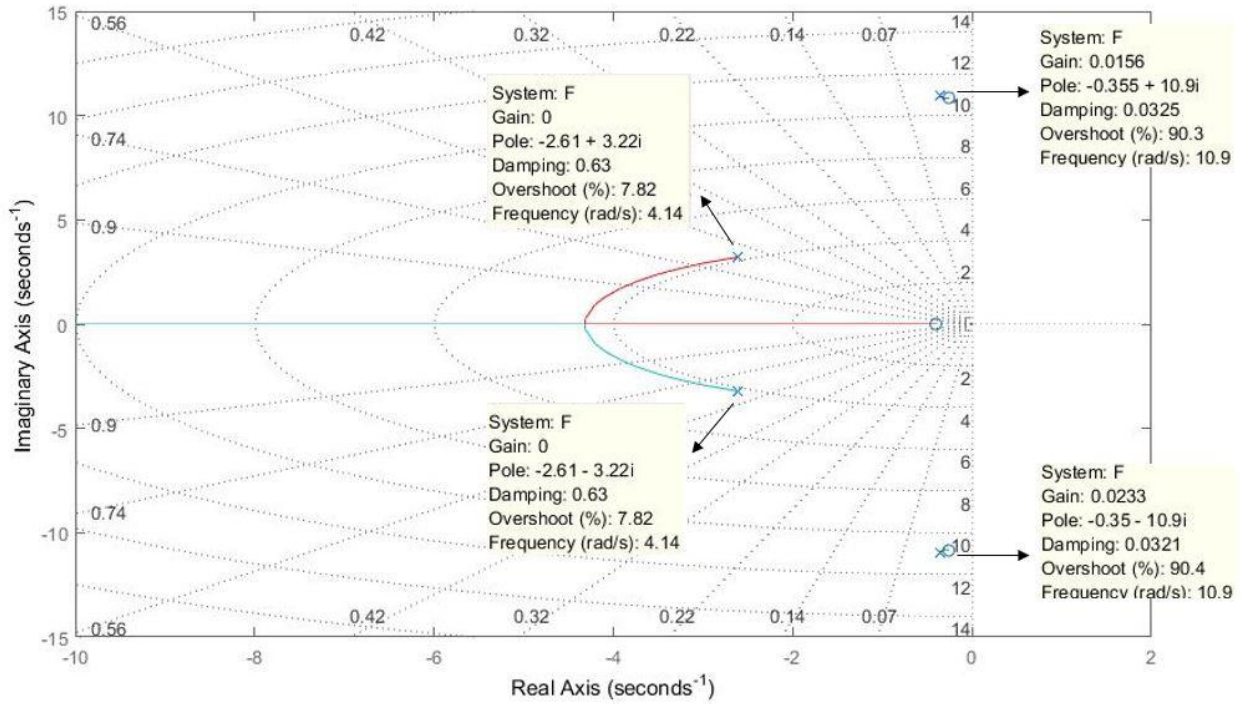


Figura 37. Localización de las raíces para el sistema reducido del modelo 2.

Del lugar se las raíces, escogemos el polo dominante como especifica en la metodología descrita en el ítem 4.2.1

$$P_{dom} = -2.61 \pm j3.2181 \quad (5.2)$$

De la ecuación de característica (4.16) y escogiendo -3 como parte real negativa:

$$P_d = -3 = -\xi w_n$$

Se escoge un valor de $\xi = 0.5$ para despejar la frecuencia w_n

Por lo tanto:

$$w_n = 6$$

Siguiendo la metodología descrita en 4.2.1 se obtiene así el valor del polo deseado

$$P_d = -3 \pm j3\sqrt{3} \quad (5.3)$$

Con los polos deseados calculados se procede a obtener el ángulo de adelanto que debe aportar la red de adelanto para que el LGR pase por dichos polos. Para esto se aplica la condición de fase ecuación (4.18), obteniéndose así el ángulo que debe compensar $\varphi = 78^\circ$

Para este modelo en particular se encontró que un cambio mínimo en la constante del lazo regulador de tensión modifica en gran medida la respuesta del sistema. Apreciación atribuible a la gran dimensión del modelo siendo así un sistema muy sensible y por tal motivo se procede a dejar el compensador diseñado con constante proporcional unitaria.

$$G_c(s) = \frac{s + 2.18}{s + 16.536} \quad (5.4)$$

The diagram illustrates a control system for a motor drive. It features a feedback loop with gain K_1 and a forward path with gain K_2 . The feedback path includes a summing junction, a block $\frac{1}{H \cdot s}$, a block W , and a block $\frac{1}{s}$. The feedforward path includes a summing junction, a block $\frac{K_3}{K_3 \cdot T_{do} \cdot s + 1}$, a block $\frac{s + 2.18}{s + 16.536}$ labeled "Red Adelanto", and a block $\frac{K_A}{T_A \cdot s + 1}$ labeled "Excitador". The output is labeled "Out1".

54

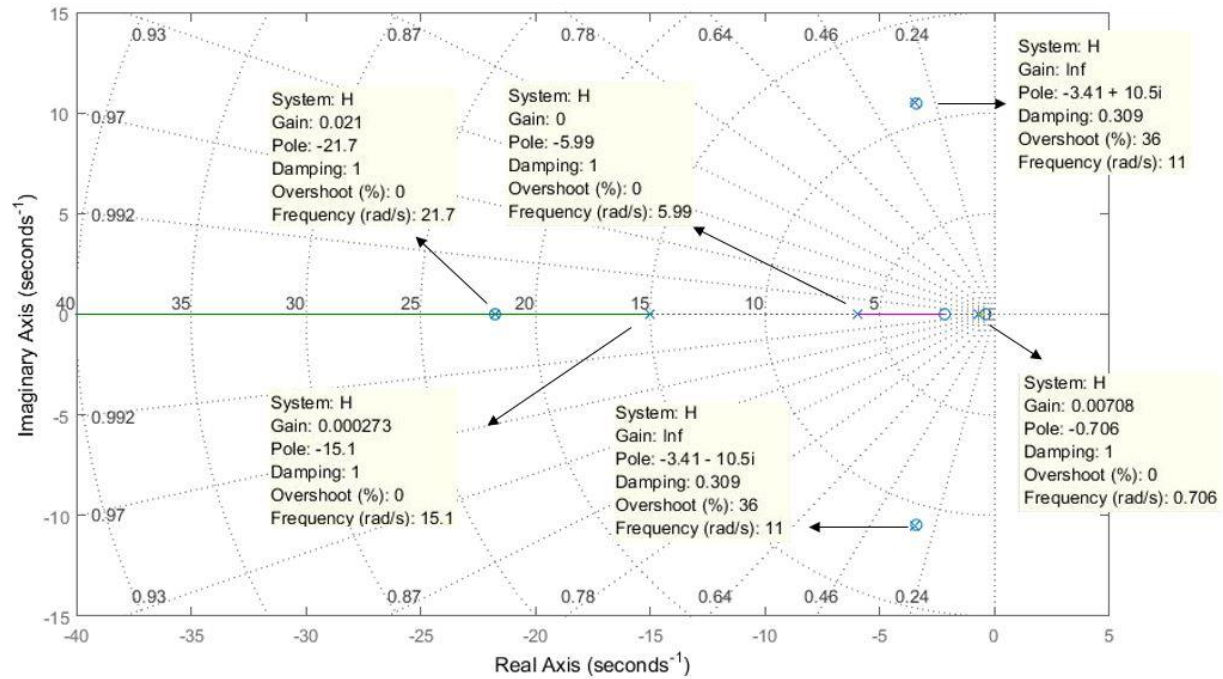


Figura 39. Localización de las raíces por compensación de adelanto con base a LGR – Modelo 2.

De la figura 39, se puede apreciar que el sistema de compensación diseñado no cruza por el polo deseado, sin embargo, mejora significativamente la tensión de excitación, como se muestra a continuación:

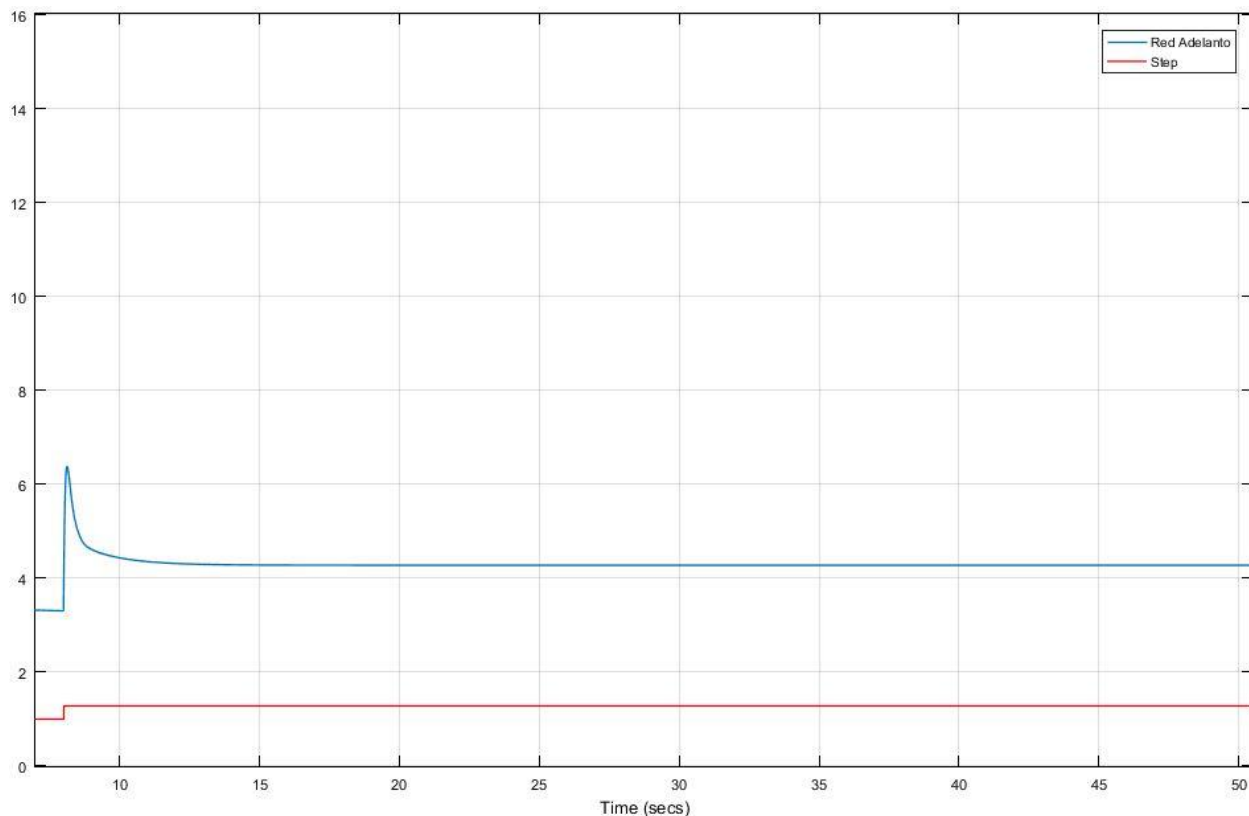


Figura 40. Curva de respuesta ante la perturbación para el modelo 2 compensado por adelanto con base a LGR.

La figura 40 muestra la curva de la respuesta al escalón donde en color azul corresponde a la respuesta de la salida de tensión del excitador del sistema compensado mediante la red de adelanto y la curva en color rojo corresponde a la referencia (escalón unitario).

De los resultados del diseño del compensador se puede observar en la figura 40 que mejora el comportamiento de la respuesta transitoria si se compara con la respuesta de paso mostrada en la figura 32, en el cual se disminuye su sobre elongación de 14.81 (sistema sin compensar) a 6.348 (sistema compensado), que corresponde a un sobrepaso de 23.33%, llegándose a un valor de operación final de 4.25; además de notarse una respuesta más suavizada y sin oscilaciones.

CAPITULO 6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS PARA EL MODELO 1.

Del diseño de la red de compensación de adelanto por el método de respuesta en frecuencia, se evidencia una mejora en la respuesta transitoria de la máquina reduciendo el sobrepaso y el tiempo de establecimiento de 32,9% y 0,506s a valores de 19,5% y 0.28s respectivamente.

Del diseño de la red de adelanto por el método de lugar de las raíces, se reducen estos valores a un 17,8% de sobrepaso y 0,289s de tiempo de establecimiento. Esta metodología presenta dos caminos para el cálculo del polo y cero del compensador. Adicionalmente se pueden escoger los valores del polo deseado de tal manera que se produzca una cancelación de polos y el sistema disminuya su complejidad. Sin embargo, en la realidad está cancelación no es tan precisa debido a que los componentes físicos no presentan exactamente las mismas propiedades. [6]

De los dos caminos de diseño de la red de adelanto por el método de lugar de las raíces, se evidencia que el método gráfico (método 1) presenta error en la modificación de la localización de los polos en el plano complejo, cosa que no ocurre por el método 2; esta inconsistencia se debe a que el método 1 se basa en un método gráfico para la obtención de los valores; la falta de precisión que presenta incurre en la eficiencia del diseño, otra razón, por lo que cuando se comparan los resultados obtenidos mediante el diseño de la red de adelanto por ambos métodos, el método 2 sobresale frente al método 1.

De los dos métodos implementados, se encuentra mayor simplicidad en el desarrollo de la metodología de respuesta en frecuencia, obteniendo una mejora en la respuesta del sistema, tanto como el método del lugar de las raíces; sin dejar de lado el hecho de que este último presenta varios caminos para obtener el diseño deseado. Se obtienen los resultados esperados por ambas metodologías verificando su función de mejorar la respuesta dinámica del sistema

Del diseño de la red de compensación de atraso por el método de respuesta en frecuencia, se observan leves cambios en la etapa transitoria de la respuesta, mejorando el sobrepaso en un valor de 27,1% y alentando la respuesta a valores de 0,653s. Adicionalmente se logra reducir el error de estado estacionario de un 0,99% a 0,497% visto de manera analítica. De estos resultados se aprecia que el sistema ya presenta una buena característica de estabilidad y la reducción que se logra en el error con este compensador es mínima.

Del diseño de la red de atraso por el método de lugar de las raíces, se disminuye el sobre paso del sistema a un 29,7%, el tiempo de establecimiento a 0,515s y se logra disminuir el error de estado estacionario a un 0,567%. Se presentan cambios mínimos en la respuesta de estado estacionario y una leve mejora en el error dado que el sistema por naturaleza ya es estable.

De las metodologías implementadas para el diseño de la red de atraso, se observa que ambas mejoran el error de estado estacionario causando cambios mínimos en la etapa transitoria y se presenta mayor simplicidad en el método de respuesta en frecuencia al momento de realizar los cálculos de la red.

Del diseño de la red Adelanto-Atraso, por el método de respuesta en frecuencia no fue posible realizarlo dado que se presenta una limitante con respecto a la traza de bode, donde se requiere un valor de cruce de ganancia en -180° que no es posible visualizar. Esto debido a que el sistema es de grado 2 y por consiguiente la traza de fase presenta un límite horizontal justamente en -180° . La metodología para el diseño de la red se puede obtener de [6].

Del diseño de la red de Adelanto-Atraso, por el método de lugar de las raíces, se logra disminuir el sobrepaso a un 17,2%, el tiempo de establecimiento a 0,301s y el error de estado estacionario a un 0,49%. Logrando de esta manera aprovechar las ventajas de ambas compensaciones, mejorando la respuesta dinámica y en estado estable del sistema.

El diseño de las redes, por ambas metodologías implica cálculos matemáticos y gráficos que por medio del software Matlab se realizan con bastante simplicidad. La selección del tipo de compensador a utilizar se realiza en función de las necesidades que se presenten, esto es, si se requiere mejorar el error en estado estable o la respuesta transitoria del sistema. La selección de la metodología a implementar se realiza con base en si se dan especificaciones en el dominio de la frecuencia y por consiguiente se pueda realizar el análisis en este dominio. Si se desea analizar la estabilidad por medio de los polos del sistema en el plano complejo se hace uso del método del lugar de las raíces. Estas simulaciones se pueden observar en el archivo anexo “Simulaciones.rar” en la carpeta “Modelo 1”.

6.2 ANÁLISIS PARA EL MODELO 2.

Del diseño de la red de adelanto por el método de respuesta en frecuencia se logra mejorar la respuesta transitoria de la salida de tensión del excitador disminuyendo la amplitud de la perturbación añadida a los 7 segundos de 14.81 a 6.085 aproximadamente, obteniéndose un sobrepaso de 22.23% para el sistema compensado (comparado con la sobre elongación del sistema sin compensar que es de 54.1%), comprobando así una correcta compensación y diseño de la red. Adicionalmente este diseño presenta la característica de tener valores altos de polo y cero dada la robustez del modelo de la máquina.

Del diseño de la red de adelanto por el método del lugar de las raíces se logra disminuir la sobre elongación de la perturbación de 14.81 a 6.348, es decir, se obtuvo un sobrepaso de 23.33% en la amplitud de la perturbación (comparado con el sobrepaso del sistema sin compensar que es de 54.1%). Verificando así una correcta compensación y diseño de la red contribuyendo a mejorar la tensión de salida del excitador del Modelo 2 estudiado, más sin embargo, se puede apreciar que el diseño del compensador no modifica de manera satisfactoria el lugar de las raíces dado que este no cruza por el polo deseado; este error se atribuye a la robustez del modelo 2, dado que solo se manipula un par de polos de todos con los que el sistema cuenta, la influencia de las demás raíces no intervenidas es lo suficientemente grande para no permitir una correcta modificación del lugar de las raíces, como ocurre con modelo 1 por el método 2 (en donde solo se trabajan con 2 polos), pero este cambio en el plano complejo altera significativamente la respuesta transitoria dando como resultado la mejora de la misma mencionada anteriormente.

Para el diseño de las redes se realizaron cálculos analíticos y gráficos haciendo uso de las herramientas Matlab y Simulink. El compensador diseñado por la técnica del lugar de las raíces arrojó valores de polo y cero bastante bajos en comparación con el diseño por medio de respuesta en frecuencia donde se evidencian valores significativamente altos. El compensador diseñado por respuesta en frecuencia logra disminuir la amplitud del primer sobre impulso del escalón aún más que el compensador diseñado por lugar de las raíces. Sin embargo, los compensadores diseñados por ambas técnicas realizan una correcta compensación en el sistema obteniendo una mejora en la respuesta transitoria del Modelo 2 ante un escalón unitario. Estas simulaciones diseñadas se pueden observar en el archivo anexo “Simulaciones.rar” en la carpeta “Modelo 2”.

CAPITULO 7. CONCLUSIONES

- Se realiza un estudio de técnicas clásicas de control como respuesta en frecuencia y lugar geométrico de las raíces para mejorar el lazo de regulación de tensión en los generadores síncronos. Se muestra su definición, componentes y procedimientos para el diseño de redes de compensación de adelanto, atraso y adelanto-atraso con el objeto de mejorar la respuesta dinámica y de estado estable de un modelo de segundo y tercer orden de la máquina síncrona.
- Se definen conceptos básicos de la máquina síncrona, de los sistemas de generación de energía eléctrica, problemas de estabilidad de tensión en los sistemas de potencia, los sistemas de excitación de los generadores, así como la función que ejerce el AVR como regulador de tensión.
- Se describen las propiedades de redes de compensación de adelanto, atraso y adelanto-atraso; el modelo de su función de transferencia, así como los distintos parámetros que la componen. Se especifica la utilidad de cada red en el mejoramiento de la respuesta de una máquina síncrona en función de las necesidades que se presenten sin alterar las características físicas de la planta.
- Se implementa en Simulink un modelo de segundo y tercer orden de la máquina síncrona. Para el modelo de segundo orden se incluye la constante del generador y el AVR. Para el modelo de tercer orden se incluyen las constantes K1-K6 y demás parámetros de la máquina, así como el excitador y finalmente un modelo reducido donde se especifica la función de transferencia como realimentación del lazo de regulación de tensión donde se encuentra ubicado el excitador; esto para propósitos de simplicidad en el cálculo de los parámetros de los compensadores.
- Se diseñan redes de compensación de adelanto, atraso y adelanto-atraso para un modelo de segundo orden de la máquina síncrona utilizando las metodologías de control Respuesta en frecuencia y Lugar geométrico de las raíces. Se implementan en el software Matlab y se obtiene la respuesta escalón unitario verificando una correcta compensación y mejora en la respuesta del sistema.
- De los resultados encontrados, se observa que la red de adelanto contribuye a mejorar la respuesta transitoria para los Modelos 1 y 2. La red de atraso contribuye en la mejora del error de estado estacionario para sendos modelos y la combinación de ambas compensaciones, en la red Adelanto-Atraso proporciona ambas mejoras en el sistema.
- Para el Modelo 2 implementado, se añade una perturbación en su tensión de salida a los 7 segundos incrementando el valor del escalón de 1 a 1.3, generándose una sobre elongación en su respuesta. Al incluir el compensador en el lazo regulador de tensión, se logra disminuir dicha sobre elongación significativamente (22.23% para el diseño por respuesta en frecuencia y de 23.33% para el diseño por lugar de las raíces) por medio de una red de adelanto utilizando ambas metodologías de control, esto comparado con la sobre elongación del sistema sin compensar que es de 54.1%, verificando así la efectividad de la compensación y la utilidad de las técnicas de control en el diseño de la red.

CAPITULO 8. REFERENCIAS

- [1] “Anexo general del retie resolución 9 0708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes anexo general reglamento técnico de instalaciones eléctricas (retie).”
- [2] N. S. S and B. Sarode Uday, “Implementation of digital automatic voltage regulator (avr) for small laboratory alternator,” *2015 int. conf. energy syst. appl.*, no. icesa, pp. 338–341, 2015.
- [3] F. P. Vargas Guerron, “Compensación de sistemas de control en el dominio de la frecuencia real (w) utilizando programas digitales,” Escuela Politecnica Nacional, 1982.
- [4] J. L. Jaime Maldonado and M. Ada, Medina, “Diseño de controladores por el método de respuesta en frecuencia de sistemas discretos,” 2011.
- [5] G. Alfonso Palacios, “Guia para modelado de estabilidad en sistemas de potencia,” Universidad de la Salle, 2017.
- [6] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Madrid: Prentice Hall, 2010.
- [7] M. Berbegal Almohalla, “Diseño y ensayo de un regulador de tensión automático para máquinas síncronas,” Universidad Pontificia Icai Icade Comillas Madrid, 2016.
- [8] K. Prabha, *Power system stability and control*. Palo aAto, California: McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [9] L. E. Vargas Ramírez, “Regulador de tensión en generadores síncronos para control volt/var en sistemas de distribución,” Ciudad Universitaria “Rodrigo Facio,” 2013.
- [10] E. Mendoza Yescas, “Control de una planta generadora de energía eléctrica,” Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2003.
- [11] R. C. Dobson, “Diseño de controladores i.,” Chile, 2011.
- [12] R. J. Koessler, “Techniques for tuning excitation system parameters,” *IEEE trans. Energy convers.*, vol. 3, no. 4, pp. 785–791, 1988.
- [13] K. Benjamin C, *Sistemas de control automático*, Edimsa. s. MEX: Prentice Hall, 1996.
- [14] D. Corrigan, “Root Locus,” *Electronic and Electrical Engineering* pp. 1-27, 2015. [online]. disponible en: http://www.mee.tcd.ie/~sigmedia/pmwiki/uploads/teaching.3c1/root_locus.pdf.
- [15] P. W. Sauer and P. M. A., *Power system dynamics and stability*. Illinois: E. Green st, 2006.